5e série, tome I, n° 7. Juillet 1931

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS

SOMMAIRE

COMPTES RENDUS DES RÉUNIONS :

Réunion ordinaire mensuelle du mercredi 6 mai 1931. p. 658.

Réunion ordinaire mensuelle du mercredi 3 juin 1931, p. 659.

Admissions des Membres titulaires, p. 659

Nécrologie de M. Ch. MILDÉ, p. 660.

Don à l'Ecole Supérieure d'Electricité; p. 660.

COMMUNICATIONS TECHNIQUES ET DISCUSSIONS (1) :

COMMUNICATIONS PRÉSENTÉES EN SÉANCE PUBLIQUE.

Sur les dommages physiologiques et la mort apparente causés par l'électricité et sur les nouveaux devoirs du médecin et de l'électricien, par M. le Docteur JELLINEK, p. 662. — Une machine électrostatique à 300 000 V à un seul plateau par M. H. CHAUMAT, p. 673.— Applications de l'électricité à l'étude de l'isolement phonique des matériaux et des bâtiments, par M. J-F. CELLERIER, p. 684.

COMPTE RENDU DES DISCUSSIONS DE LA SEMAINE DE NOVEMBRE 1930 (fin) (1).

6e Section. — (Voir sommaire p. 705.

Mesure astronomique de la période du pendule, M. BAYLE, p. 716.

INFORMATIONS DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ELECTRICIENS,

13e Congrès Tchécoslovaque des Ingénieurs électriciens, p. 726.

TRAVAUX DES SECTIONS (1) :

Communications. — 1e *Section*. — Oscillations forcées d'un alternateur ou moteur synchrone polyphasé (M MARGAND), p 725. — 4e *Section*. — Contribution expérimentale à l'étude de la Conductibilité du sol (M. FALIOU), p. 755.

OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ, p. 761.

BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS, p. 763.

IL Y A TRENTE ANS, p. 768.

---

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

COMPTE RENDU DES RÉUNIONS

RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du Mercredi 6 Mai 1931.

Présidence de M. Chaumat.

La séance est ouverte à 20 h. 30.

Dans le grand amphithéâtre de la Faculté de Médecine, M. le Président salue M. le Professeur Jellinek, titulaire de la chaire d'électropathologie à l'Université de Vienne (Autriche).

M. le Professeur Jellinek présente sa communication sur « *Les dommages physiologiques et la mort apparente causés par l'électricité et sur les nouveaux devoirs du médecin et de l'électricien* ».

M. le Président remercie vivement M. le Professeur Jellinek et annonce qu'une discussion, sur le même sujet, interviendra lors de la semaine de novembre prochain.

La séance est levée à 22 h. 15.

RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du Mercredi 3 Juin 1931.

Présidence de M. H. Chaumat.

La séance est ouverte à 20 h. 30.

Le procès-verbal de la précédente séance est adopté.

Il est donné connaissance des demandes d'admission suivantes :

MM.

Bajon (Adolphe-Henri), ingénieur aux transformateurs de mesure Walter, 64, avenue du Docteur Durand, à Gentilly (Seine). Domicile : 2, avenue Victor-Hugo, à Meudon (Seine-et-Oise). — Présenté par MM. de la Gorce et Dietsch.

Barbier (Marcel-Louis-Maurice), élève à l'E. S. E., 4, place Voltaire, à Paris (11e). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Benassy (Gérard), élève à l'E. S. E., à Mortagne-sur-Gironde (Charente-Inférieure). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Berg (Marcel-Joseph-Célestin), élève à l'E. S. E., 4, place Voltaire, à Marseille (Bouches-du-Rhône). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Bezri (Ibrahim), élève à l'E. S. E., 5, boulevard Jourdan, Paris (14e). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Bouquier (Jean-Louis), élève à l'E. S. E., 33, rue des Bois, à Paris (19e). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Chable (André-Marcel-Charles), élève à l'E. S. E., 94, rue de Maubeuge, à Paris (10e). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Champenois (André-Pierre-Robert), élève à l'E. S. E., 22, rue des Ecoles, à Chatou (Seine-et-Oise). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Clavel (Jean-René), élève à l'E. S. E., 7, rue Marcellin-Berthelot, à Nanterre (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Deflaceliere (Louis-Edmond), élève à l'E. S. E., 11, rue des Prés-Lorêt, à Fontenay-sous-Bois (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Ducass (Roger), élève à l'E. S. E., 262 *bis*, rue des Pyrénées, à Paris (20e). — Présenté par Janet et Guilbert.

Duval (Paul-Marie-Alexis), constructeur-électricien, 5, rue du Val-d'Osne, à Saint-Maurice (Seine). — Présenté par MM. Faber Ch. et Faber P.

Feron (Maurice-Paul), représentant des Etablissements Raynaud et Cie et de la Société Française d'Electricité A. S. E. A., 8, rue Vauban, à Bordeaux (Gironde). — Présenté par MM. Raynaud et Wagner.

Garceau (Jacques-Pierre-Marie), ingénieur à la C. P. D. E., 12, villa Médicis, à Bois-Colombe (Seine) — Présenté par MM. Imbs et Sartre.

Gobaud (Jean-Félix), élève à l'E. S. E., Salles-de-Villefagnan (Charente). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Hernandez (José-Antonio), caretera de Ayete 37-2°, à San Sebastian (Espagne). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Iribas (Luis), élève à l'E. S. E., 9, avenue Pierre-Larousse, à Malakoff (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Latune (Pierre), élève à l'E. S. E., à Blacons (Drôme). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Mottez (Robert-Noël-Gérard-Adolphe), licencié ès-sciences, élève à l'E. S. E., « Campagne La Pintade » à Sainte-Marguerite, près Marseille (Bouches-du-Rhône). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Mournaud (Jacques-Henri-Marc-Marie), élève à l'E. S. E., 1 *bis*, rue du Maine, à Paris (14e). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Narcy (Roger-Nicolas), élève à l'E. S. E., 10, rue de Plaisance, à Créteil (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Neuville (Marcel-Maurice-Louis), élève à l'E. S. E., 5, rue du Pas-de-la-Mule, à Paris (4e). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Paris (Raymond-Albert), élève à l'E. S. E., 153, boulevard Lefebvre, à Paris (15e). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Pekly (Albert-Paul), Ateliers Pekly, fabricant d'appareils de mesures électriques, 42, rue Jeanne-d'Arc, à Saint-Mandé (Seine). — Présenté par MM. Grosselin et Petit G. E.

Penot (René), élève à l'E. S. E., 4, avenue de la République, à Meaux (Seine-et-Marne). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Perin (André-Henri), entrepreneur-électricien, 156, rue de Bordeaux, à Angoulême (Charente). — Présenté par MM. Delasalle et Chenevier.

Peveri (Paul-Pierre), élève à l'E. S. E., 9, avenue de Bry, Le Perreux (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Pobe (Camille-Pierre-Félix), élève à l'E. S. E., 89 *bis*, rue de Créteil, à Alfort (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Rigaud-Monin (Louis-Antoine), élève à l'E. S. E., 42, rue de Turenne, à Grenoble (Isère). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Rivat (Pierre-Marie-Adrien), élève à l'E. S. E., 9, avenue Pierre-Larousse, à Malakoff (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Romagny (Paul-Roger), élève à l'E. S. E., 157, Grande-Rue, à Villemonble, (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Sapir (Jechiel), élève à l'E. S. E., 158, rue de Paris, à Vanves (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Suraud (Pierre-Marcel-Jean), élève à l'E. S. E., école de garçons, La Couronne (Charente). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Szasz (Charles), ingénieur E. T. P., 23, rue Truffaut, à Paris. — Présenté par MM. Roullet et E. Roth.

Trabarel (André-Achille), élève à l'E. S. E., 43, rue Klock, à Clichy (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Trouillard (Roger-Jacques-Albert), élève à l'E. S. E., 61, rue de Saintonge, à Paris (3e). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Van de Wiel (Fernand), administrateur-délégué de la Société anonyme des Accumulateurs Tudor, 60, chaussée de Charleroi, à Bruxelles (Belgique). Domicile : 59, avenue Montjoie, à Bruxelles (Belgique) — Présenté par MM. Gruchon et Jumau.

Vauzelle (Jean-Joseph), élève à l'E. S. E., cité Berliet, 8e villa, Saint-Priest (Isère). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Zakheim (Jokob), élève à l'E. S. E., 158, rue de Paris, à Vanves (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Sans opposition de la part des Membres présents, ces candidats sont élus Membres titulaires de la Société.

M. le Président annonce le décès de M. Ch. Mildé, qui a été à plusieurs reprises Membre de notre Comité. Il a été Membre de la Commission administrative de l'École Supérieure d'Électricité. Il figure parmi les donateurs les plus généreux du Laboratoire Central et de l'École Supérieure d'Électricité, et a été Président du Syndicat des Industries Électriques.

M. le Président annonce un don à l'École Supérieure d'Électricité de 3 transformateurs monophasés par les Établissements R. Vautier, à Asnières.

M. le Président cède le fauteuil à M. Cellerier et présente sa communication sur *Une machine électrostatique à 300 000 V à un seul plateau.*

M. CELLERIER remercie chaleureusement M. le Professeur CHAUMAT et ses collaborateurs pour la mise au point d'une machine qui a donné des résultats des plus intéressants.

M. CELLERIER présente sa communication sur l'*Application de l'Electricité à l'étude de l'isolement acoustique des matériaux.*

M. le Président remercie M. CELLERIER de sa très intéressante communication. Ses travaux lui ont permis d'apporter des précisions fort précises dans une matière aussi complexe. Il le félicite des résultats qu'il a obtenus.

La séance est levée à 23 h. 30.

SUR LES DOMMAGES PHYSIOLOGIQUES ET LA MORT APPARENTE CAUSÉS PAR L'ÉLECTRICITÉ ET SUR LES NOUVEAUX DEVOIRS DU MÉDECIN ET DE L'ÉLECTRICIEN

par le Dr Stefan JELLINEK, *Professeur d'électropathologie à l'Université de Vienne.*

Le conférencier rappelle les travaux de son maître d'Arsonval puis les diverses causes d'accidents électriques; il montre que les conséquences en sont souvent, non des brûlures, mais des lésions de nature mécanique, caractérisées par l'absence de douleur et par une tendance remarquable vers la guérison spontanée; il en déduit une thérapeutique nouvelle : pas d'opérations, ponctions lombaires; lutte contre l'hémorragie, section des veines, respiration artificielle bien faite. Il termine par un rappel des effets biologiques à distance, produits par l'électricité.

Permettez-moi, en premier lieu, de vous remercier de l'aimable invitation de la Société française des Electriciens. Cette invitation m'offre la précieuse occasion de parler devant un forum compétent d'ingénieurs français, de médecins français, et de résumer les recherches, qui ont rempli sans interruption 30 années de ma vie. Veuillez croire, Messieurs, que j'apprécie, que j'estime d'autant plus l'honneur que vous me faites, car ce sont des travaux français — les œuvres fondamentales du grand Maître d'ARSONVAL — qui m'ont conduit, lorsque, j'étais encore jeune médecin et que je commençais à m'occuper des problèmes cliniques et pathologiques des lésions causées dans l'industrie électrique. Les œuvres de d'ARSONVAL intitulées « Dangers des générateurs mécaniques d'électricité ; moyens de les éviter » et « La mort par l'électricité dans l'industrie, ses mécanismes physiologiques, moyens préservateurs », parues dans les Comptes Rendus de l'Académie des Sciences en 1885 et 1887 n'ont pas vieilli, au contraire, elles se lisent comme si elles étaient d'aujourd'hui. Mais que dirons-nous de son exploit, de son chef-d'œuvre, nommé par lui-même « l'autoconduction ou nouvelle méthode d'électrisation des êtres vivants », dont il parla pour la première fois, en février 1891 à la Société de Biologie et pour lequel, en 1893, il fut couronné du prix La Caze par l'Académie des Sciences.

La découverte ingénieuse faite par D'ARSONVAL du phénomène physiologique concernant l'autoconduction, laquelle, dans son essence et dans sa conception peut être comparée à la découverte de FARADAY concernant le phénomène physique de l'induction, n'a reçu qu'aujourd'hui, soit 40 ans plus tard, sa mise en valeur, par le développe-



Fig 1

ment de la T. S. F. ; les recherches biologiques de haute fréquence faites actuellement aux Etats-Unis, à Iéna, à Paris et à l'école électropathologique de Vienne, nous donnent une faible idée de la grandeur de la découverte de D'ARSONVAL et de l'importance de son travail pour l'humanité souffrante en général et pour la gloire de la science française en particulier. Et vous comprendrez, Messieurs, que j'éprouve une profonde satisfaction, comme élève de D'ARSONVAL et comme directeur de la chaire d'électropathologie, à exprimer, ce soir publiquement, ma reconnaissance et à m'incliner, plein d'admiration, devant le grand maître D'ARSONVAL !

Dominé par ces sentiments, je vais essayer de vous esquisser l'état actuel de l'électropathologie viennoise ; j'éviterai toute théorie et je ne vous apporterai que des faits positifs, des choses vues par moi-même et en même temps, je vous indiquerai des problèmes et des devoirs, lesquels sont de la plus grande importance pour l'ingénieur et pour le médecin.



Fig 2.

Pour commencer, vous allez voir quelques projections se rapportant aux accidents et aux incendies causés par l'électricité et se produisant dans la maison, dans l'atelier, dans l'agriculture, sur la voie publique, etc. ; vous les connaissez naturellement, mais je répète que les projections que vous voyez ne sont pas des dessins conventionnels, mais des dessins pris sur le vif ; il me semble qu'une collection de ce genre serait appelée à éclairer le public sur le maniement des appareils électriques et, de cette manière, à compléter les prescriptions de sécurité.

Un mouvement est venu d'Amérique pour répandre, par des affiches, la notion des dangers du travail et par là, diminuer les accidents. Mais cette méthode, toute bonne qu'elle soit, par exemple pour les précautions à prendre dans la technique des machines, dans l'utilisation des échafaudages, des moyens de communication, etc., cette méthode n'est pas appropriée à éclairer le public sur la genèse d'un accident électrique et à lui donner la protection nécessaire.

La deuxième question sur laquelle je vais insister, concerne *les effets locaux*, les blessures aux points où l'électricité entre dans le corps, question plutôt médicale, mais intéressante aussi pour l'ingé-



Fig. 3.

nieur, car l'ingénieur est ordinairement le premier, quelquefois même le seul, qui ait à s'occuper de l'accidenté, par exemple dans les montages très éloignés, dans les colonies, etc.

Autrefois, toute lésion locale était considérée comme brûlure et traitée comme telle. Par les recherches systématiques que j'ai faites, j'ai pu constater qu'outre les brûlures, il y a encore des lésions locales, lesquelles par leur aspect et par le cours de la maladie, se différencient complètement des brûlures. Reconnaître cet état de choses est très important au point de vue du traitement ; par exemple, dans le temps où l'électropathologie n'existait pas encore, on croyait indispensable d'amputer, quand les destructions étaient profondes ; aujourd'hui nous avons appris qu'une opération mutilante, que même toute opération est, en général, complètement superflue. La vraie blessure électrique, laquelle en beaucoup de cas n'a aucun rapport avec les brûlures, constitue une classe spéciale qui a ses propres règles,

sa propre histoire et se distingue par une tendance extraordinaire vers la guérison ; elle se guérit par une cicatrisation favorable aussi bien cosmétiquement que fonctionnellement, même là où des parties de l'os ou des articulations ont été mises à nu et même là où de grands séquestres se sont détachés. Sur des projections en série, on peut suivre le



Fig. 4.

cours particulier de la guérison, tel qu'il n'en a pas été observé jusqu'à présent dans la pathologie ; par exemple, il s'agit d'une blessure ayant détruit profondément la partie osseuse et l'articulation du coude qui pourtant retrouva sa pleine fonction. Ces succès extraordinaires furent obtenus par une thérapeutique purement conservatrice, laquelle est d'autant plus justifiée, que nous ne savons pas, au premier abord, jusqu'à quel point la destruction s'étendra ; la

thérapeutique conservatrice est d'autant plus à sa place, que l'état général n'est pas influencé par les destructions les plus avancées ; ces destructions sont bien des nécroses, mais des nécroses aseptiques, sans fièvre, sans trouble de l'appétit, sans altération du cœur et des autres fonctions importantes.

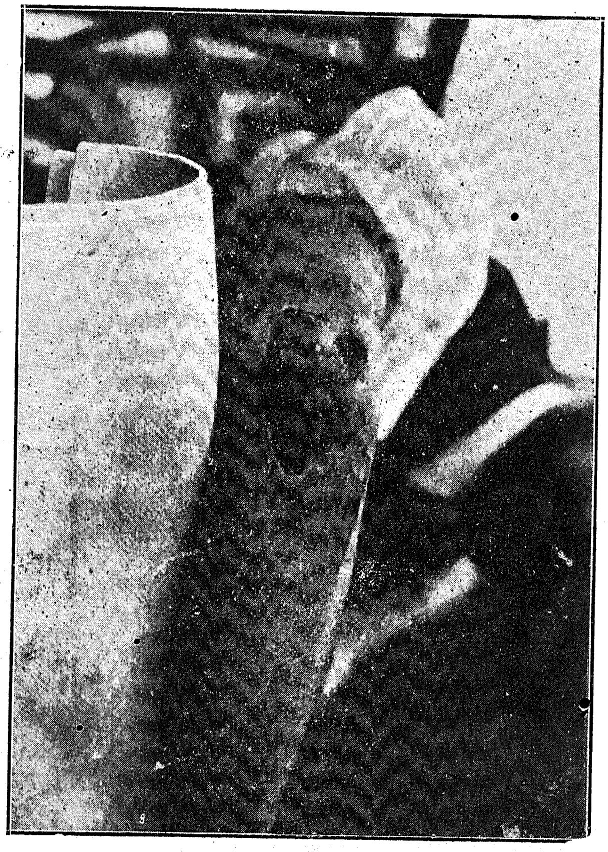


Fig. 5.

J'attire spécialement votre attention sur un symptôme particulier de la lésion électrique, qui est l'absence absolue de douleur, ce qui prouve clairement qu'il y a un *trait de séparation* entre une marque électrique et une brûlure électrique; la brûlure électrique est, en effet, comme la brûlure vulgaire, suivie de douleurs !

Connaissant cette différence et me fiant à la grande tendance à la guérison, je ne fais presque jamais de traitement opératoire ; je n'arrive aux amputations que dans les cas les plus rares et seulement si des symptômes menaçant la vie, semblent avoir leur point de départ dans

un membre grièvement endommagé. S'il fallait encore une autre preuve pour montrer que le caractère de maintes lésions locales n'est pas causé par *l'action thermique* de l'électricité, mais au contraire par une action purement mécanique, on la trouvera à l'examen microscopique ou radiologique des os frappés par le courant électrique ; on trouve à l'intérieur de la structure osseuse, des dessins d'une finesse



Fig. 6.

extrême presque invisibles à l'œil nu, quelquefois des dessins très prononcés en forme des dendrites ; ces dessins nous montrent jusqu'à l'intérieur le chemin suivi par l'électricité et, en outre, ils nous informent sur le sort de cette dissociation et nous révèlent la thérapeutique à suivre.

Ces lésions mécaniques à l'intérieur de la structure osseuse méritent notre attention par cela déjà, qu'au point de vue morphologique elles

montrent une certaine concordance avec les traces sur la matière inerte telle que fer, porcelaine, débris de vêtements et nous permettent ainsi de reconnaître l'électricité comme cause de ces altérations. Cette conclusion nous est permise d'autant plus que j'ai réussi à produire expérimentalement des traces semblables, dont la morphologie concorde absolument avec celles que nous trouvons dans la nature et dans la technique.

Cette nouvelle branche de la science — l'électrophysiographie — issue de l'électropathologie, a prouvé son droit à l'existence dans une série de cas judiciaires, civils et criminels.

Pourtant, c'est non seulement au sujet des *lésions locales*, mais aussi au sujet des *effets généraux* sur le corps, que nous avons appris à différencier exactement les symptômes et que nous avons construit une thérapeutique basée, d'une part sur des indications, d'autre part sur des contre-indications; ainsi nous savons aujourd'hui, que bien des symptômes, par exemple dans les reins ou dans d'autres organes internes, reposent sur des altérations vasomotrices, que quelques paralysies aiguës disparaissent très vite, qu'il se produit aussi des dégénérescences de la moelle rachidienne ou des nerfs périphériques, que quelques troubles de l'état général, tels que céphalalgie, convulsions, délires, aliénation mentale, etc., proviennent d'une augmentation de la pression du liquide cérébrospinal, par laquelle la vie est menacée ; dans des cas semblables nous avons réussi, nombre de fois, au moyen de ponctions lombaires, à sauver des mourants. *L'effet décisif de cette opération* (ponction lombaire) relativement simple, pour combattre les symptômes dangereux sur les électrocutés, est trop peu connu et par conséquent l'opération est malheureusement trop peu souvent exécutée.

Un autre résultat, non moins important, de la clinique électropathologique, consiste à être *toujours prêt à arrêter des hémorragies :* car il arrive que d'une blessure semblant insignifiante, une hémorragie éclate tout à coup avec tant de véhémence, que l'accidenté meurt par épuisement du sang ; même dans les stations chirurgicales de premier ordre il est arrivé que, comme les infirmières n'étaient pas préparées, l'accidenté est mort par perte de sang. La raison de ces hémorragies est que la structure des tissus des vaisseaux est détériorée ou que des thromboses se produisent sur les parois ; la conséquence en est, que les vaisseaux deviennent particulièrement fragiles ; la chose n'est pas étonnante en soi, si on pense que le sang et les sels du sang sont de bons conducteurs de l'électricité et que, par consé-

quent, les vaisseaux ont à soutenir le choc principal de la chute électrique.

Sur ce fait de la possibilité des altérations vasculaires aussi dans les

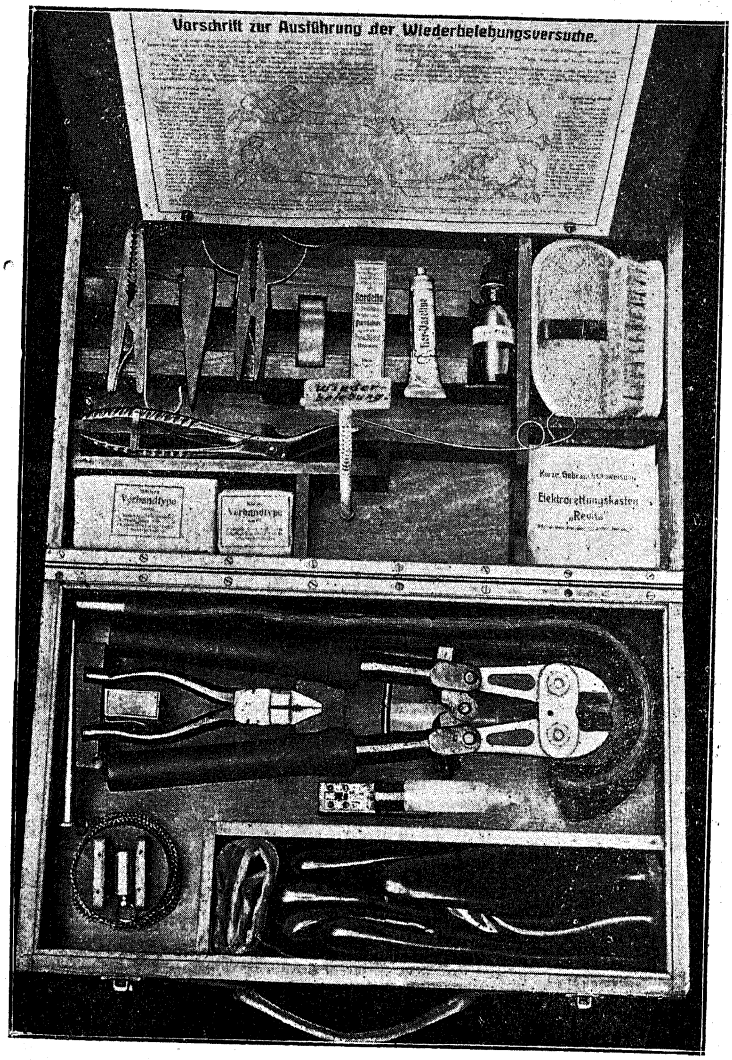


Fig. 7.

organes internes, p. e. jaunisse provenant du foie, albumine ou sang dans les urines, sur ce fait est basée aujourd'hui une *thérapeutique rationnelle*, tandis que, il y a 30 ans, on traitait encore dans le vague et dans le doute.

Non seulement dans la clinique, mais aussi sur les lieux de l'accident, je me suis efforcé de baser sur des faits de *nouvelles méthodes*

de sauvetage, afin de délivrer et de ranimer la victime : ces faits sont tirés, en partie de circonstances électrotechniques, en partie de la salle d'autopsie. J'ai recommandé de nouveaux outils de sauvetage réunis dans une *boîte de sauvetage*, fig. 7, destinée principalement à l'organisation du service et à l'éducation des sauveteurs.

Concernant la réanimation des victimes, la thèse du célèbre D'ARSONVAL, présentée en 1884, restera toujours un axiome : *Un électrocuté doit être traité comme un noyé.* La respiration artificielle sera soutenue par des sections des veines, par des ponctions lombaires et

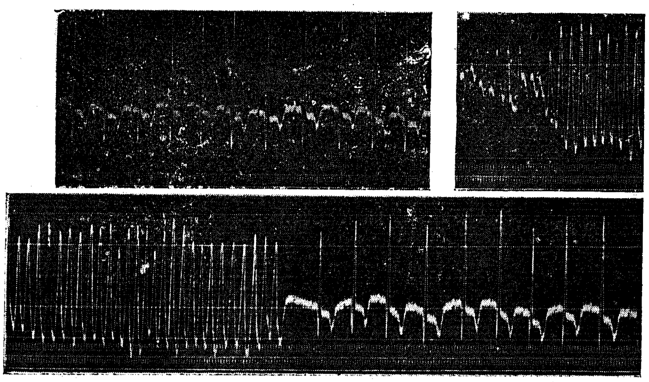


Fig. 8.

par l'inhalation d'un peu d'acide carbonique. J'attire votre attention sur ce fait, que la respiration artificielle n'est pas sans danger ! que mal appliquée, elle peut même tuer l'accidenté ! Il faut mettre au compte de l'électropathologie viennoise que la doctrine concernant les trémulations fibrillaires du cœur précédemment considérées comme mortelles, a été réfutée par mes recherches sur des personnes et sur des animaux (sur singes), ce que j'ai prouvé — et ce que je vous démontrerai — en partie par des organes pathologiques des victimes (p. e. hémorragie subépicardiale, œdème du cerveau et des poumons), en partie par des enregistrements électrocardiographiques et par un film cinématographique : les trémulations fibrillaires du cœur (fig. 8) produites sur des singes par l'électricité disparaissent complètement et le rythme normal du cœur se rétablit : le pessimisme dans la question de réanimation, en conséquence duquel beaucoup de victimes étaient abandonnées sans secours, a perdu son fondement par le résultat de ces recherches ; en effet, le nombre des réanimés augmente de jour en jour.

Encore un mot sur les effets biologiques de l'électricité à distance ; c'est la question des maladies professionnelles par l'électricité. Là aussi, je m'appuie sur les recherches fondamentales de D'ARSONVAL, qui, il y a 40 ans environ, a entamé la question. J'ai institué une série de recherches dans des champs électriques (ondes entretenues de 3 mètres) et j'ai pu constater que des souris nouvellement nées, placées dans un champ électrique, se développaient plus rapidement que les témoins, et que des œufs de perroquet non précouvés arrivent à germination des œufs précouvés à complète maturité au bout de quinze jours sous la seule influence du champ électrique. Cette question complexe et d'autres questions électropathologiques ont été traitées d'une manière magistrale par Louis BAZY dans la *Presse médicale* du mercredi, 1er avril 1931. Louis BAZY, médecin en chef du réseau Paris-Orléans, élève de D'ARSONVAL comme moi, est aujourd'hui en France parmi les premiers représentants comme BALTHAZARD, NAVILLE, SIMONIN, ZIMMERN etc., de l'électropathologie et je suis persuadé, que par sa coopération, l'électropathologie prendra un nouvel essor !

Mes explications plus que fragmentaires sont terminées. Vous direz que certaines questions importantes n'ont pas été mentionnées, que d'autres n'ont été que superficiellement effleurées ; mais considérez que le volume et la variété de la matière et ma crainte d'abuser de votre patience m'ont obligé à ne vous montrer que quelques coupures de ma collection de 2 000 projections. Cependant, mes explications ne devaient être qu'un bref compte rendu sur des recherches, lesquelles ayant leurs racines en France, furent ensuite continuées systématiquement par moi à Vienne pendant 30 ans, où elles sont devenues une branche scientifique indépendante. Si j'ai réussi à obtenir pour cette jeune science le crédit de mes collègues français, le but de ma conférence a été largement dépassé.

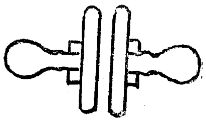
UNE MACHINE ÉLECTROSTATIQUE A 300 000 V A UN SEUL PLATEAU [1]

par M. H. CHAUMAT.

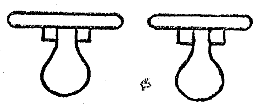
Professeur au Conservatoire national des arts et métiers.

L'auteur expose la suite des recherches entreprises avec la collaboration de M. Ed. Lefrand sur la construction des machines électrostatiques. Il est arrivé à obtenir 300 000 V avec une machine à un seul disque de 46 cm de diamètre, et une puissance qui est environ 30 fois celle d'une machine de Wimshurst du type courant. La machine a été présentée en marche au cours de la séance.

J'ai eu l'honneur ici même d'exposer devant vous les principes qui devaient servir de directives pour la réalisation rationnelle des machines électrostatiques..



(1)



(2)

Fig. 1.

Je rappelle l'expérience fondamentale, relative à la déformation des systèmes isolés.

Si nous considérons un condensateur plan, chargé à la différence de potentiel U, il prend une charge :

$$Q = CU$$

et possède une énergie :

$$W = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}.$$

(1) Communication présentée à la Réunion mensuelle de la Société française des Electriciens du 3 juin 1931.

Si d'une position (1) (fig. 1), le système étant isolé de la source, on passe à une position (2) (fig. 1) pour laquelle la capacité est beaucoup plus faible, la *charge étant constante*, le *potentiel croît*, et l'*énergie électrique croît*. On a une génératrice électrostatique.

On obtient, dans la position (2), une élévation de tension telle que, après avoir chargé initialement à 110 volts, on peut obtenir une étincelle correspondant à 10 ou 20 000 volts.

L'expérience a été faite devant vous.

Dans une machine électrostatique, qu'on le veuille ou non, qu'on

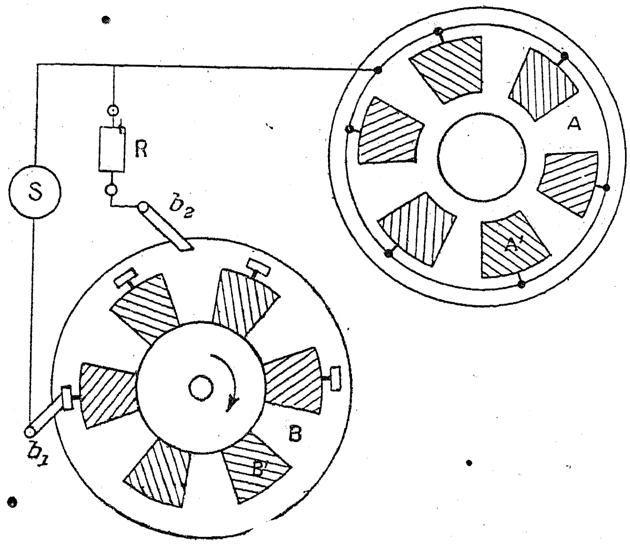


Fig. 2.

l'ait réalisé judicieusement ou non, il y a toujours les éléments d'un condensateur et une charge initiale ou mieux deux charges initiales plus ou moins bien définies.

Quand on met la machine en mouvement, puisque la tension monte, c'est que la capacité diminue.

Je me suis proposé de réaliser l'expérience fondamentale sous une forme tournante mais avec des dimensions définies, calculables, en partant d'une charge initiale bien connue et bien déterminée.

La communication de ce soir a pour but de vous mettre au courant des résultats obtenus.

Je vous fais cette communication tant en mon nom qu'au nom de mon collaborateur immédiat, M. Edouard LEFRAND, chef des travaux d'électricité industrielle au Conservatoire National des Arts et

Métiers, et je suis heureux de rendre ici hommage à sa ténacité, à sa science, à son dévouement, qui nous ont permis de vaincre d'assez grosses difficultés.

J'associe à cet hommage toute mon équipe qui a travaillé pendant de longs mois à la réalisation que je vous présente ce soir.

Une idée très répandue et qui a certainement paralysé les initiatives est que, la machine électrostatique ayant une résistance considérable, il était impossible d'avoir un débit sans une chute de tension inadmissible.

J'ai montré qu'il n'en était rien et qu'il était possible de réaliser des machines dont la chute de tension, en marche, pouvait être inférieure à une fraction quelconque que l'on pouvait se fixer (1).

Dans notre première conception (2), la machine comprenait un plateau fixe A en matière isolante portant des secteurs métalliques tous reliés entre eux par une bague conductrice.

En regard, était monté un plateau mobile B, portant, lui aussi, des secteurs métalliques reliés entre eux et qui prennent contact soit sur le balai b_1, soit sur le balai b_2, tous les deux fixes (fig. 2).

Les deux plateaux sont en regard l'un de l'autre, à petite distance, et ont le même axe. On les a déplacés latéralement pour la clarté de la description.

Les liaisons des balais et des plateaux fixes sont faites, avec la source de charge S et avec l'appareil récepteur R, comme il est indiqué.

Quand le plateau mobile tourne dans le sens de la flèche, les secteurs fixes et mobiles réalisent une capacité variable entre une valeur maxima, soit c quand les secteurs sont en regard, et une valeur minima $\frac{c}{m}$ quand les secteurs mobiles sont en face d'un intervalle entre les secteurs fixes, m étant plus grand que l'unité.

La source fournit à chaque condensateur élémentaire, de capacité c, une charge initiale :

$$q_0 = cu$$

et une énergie cu^2.

La différence de potentiel maxima U et l'énergie maxima W de chaque condensateur élémentaire, prennent les valeurs :

$$U = mu,$$

$$W = \frac{1}{2}\frac{c}{m}U^2 = \frac{1}{2}\frac{c}{m}m^2u^2 = \frac{1}{2}cmu^2.$$

(1) C. R. de l'Académie des Sciences, 6 mai 1929
(2) C. R. de l'Académie des Sciences, 3 juin 1929.

Il y a donc un rendement organique tenant à la manière dont la machine fonctionne et qui est :

$$\frac{\frac{1}{2}cmu^2}{cu^2+\frac{1}{2}cmu^2}=\frac{m}{m+2}.$$

Ce rendement organique pourrait être fort élevé si l'on réussit à faire m assez grand, c'est-à-dire si l'on réussit à rendre la capacité minima très petite devant la capacité maxima.

Dans l'hypothèse où la durée de contact avec le balai b_2 est assez grande pour que les condensateurs élémentaires se déchargent complètement, et où l'appareil d'utilisation R serait une résistance morte, on peut calculer facilement l'intensité moyenne et la puissance d'une telle machine qui comprendrait p condensateurs élémentaires, et dans laquelle le plateau mobile tournerait à la vitesse de n tours par seconde.

On trouve, car les p condensateurs se chargent en parallèle en même temps et se déchargent p fois par tour et n fois par seconde :

$$I_{\text{moyen}}=np^2cu$$

$$P=\frac{1}{2}np^2cmu^2.$$

Il ne paraissait pas, *à priori*, impossible, avec les matériaux existants, de construire une machine pouvant développer une puissance de l'ordre du kilowatt.

Dans la réalisation, nous avons d'abord rencontré d'énormes difficultés d'isolement.

Si l'on suppose, *à priori*, que la capacité de la machine varie en fonction du temps suivant une loi linéaire telle que

$$C=C_0-at$$

et si l'on admet que la résistance d'isolement R est une constante, (ce sera le cas, par exemple, si l'on imagine que le diélectrique est parfait et que l'isolement R est simplement l'isolement entre les bornes de la machine) ;

on trouve alors que pour que la tension croisse il faut que l'on ait :

$$Ra-1>0.$$

Suivant le signe $Ra-1$ la tension peut croître ou décroître.

Mais la tension pourrait croître et la machine n'être pas pour cela génératrice si la perte par le mauvais isolement est trop grande.

Si, entre les deux états limites, capacité maxima C_0 au temps zéro, capacité minima $\frac{C_0}{m}$ au temps τ,

si l'on pose

$$\tau' = \frac{m}{m-1}\tau.$$

le calcul montre que :

pour $C_0R < \tau'$ la tension baisse

pour $C_0R > \tau'$ la tension monte.

Mais dans tout l'intervalle défini par

$$\tau' \leqslant C_0R \leqslant 2\tau'$$

la tension croît tandis que l'énergie électrique décroît.

Pour que l'énergie électrique finale soit plus grande que l'énergie électrique initiale, il faut que l'on ait C_0R beaucoup plus grand que $2\tau'$.

Ce qui montre l'*intérêt d'un très haut isolement et de grandes vitesses.*

Ces conclusions, en quelque sorte qualitatives en raison de nos hypothèses simplifiées du début, restent les mêmes, si au lieu de supposer la résistance d'isolement constante, on la suppose variable avec le temps, comme c'est le cas si cet isolement est dû au propre diélectrique du condensateur, en admettant alors que l'isolement est parfait entre les bornes de la machine.

Si l'on appelle, en effet, K le pouvoir inducteur spécifique du diélectrique d'un condensateur, et si on appelle ρ sa résistivité en nous plaçant dans la même hypothèse que précédemment, à savoir que la capacité de machine varie, en fonction du temps, suivant la loi linéaire

$$C = C_0 - at$$

on trouve que :

$$R = \frac{K\rho}{4\pi(C_0 - at)}$$

dans l'hypothèse que les condensateurs élémentaires peuvent être assimilés pour les calculs à des condensateurs plans.

Si, d'autre part, nous supposons que la capacité passe, de la valeur initiale C_0 à sa valeur minima $\frac{C_0}{m}$ dans l'intervalle de temps τ, un calcul, qu'il est inutile de développer ici, montre que l'on aura un accroissement d'énergie électrique seulement dans le cas où la con-

dition

$$\tau < \frac{K\rho}{8\pi} \operatorname{Log} m$$

se trouvera remplie.

Cette condition montre encore l'intérêt d'une grande vitesse pour diminuer le temps τ et l'intérêt d'un très haut isolement et d'un pouvoir inducteur spécifique aussi élevé que possible. Or, à cause du mouvement, le diélectrique est, au moins en partie, de l'air et on est limité pour augmenter K.

Il faudra donc s'en tenir aux *très grandes vitesses et aux très hauts isolements.*

C'est là que les difficultés sont devenues considérables.

L'isolement des diélectriques connus diminue, en effet, très vite quand la tension croît, et nous n'avons pu obtenir de résultats encourageants, après des mois d'essais et des tentatives par centaines, qu'avec une certaine variété d'ébonite à cassure fauve. Et, encore, il faut avoir soin de gratter soigneusement la surface et de la paraffiner.

On rencontre des difficultés d'un autre ordre dans ce domaine nouveau où nous avons tout à apprendre.

Comme on escompte l'obtention de très hautes tensions, on est conduit à écarter assez notablement les armatures des condensateurs élémentaires pour éviter des décharges intérieures dès que, par le jeu de la machine, la capacité commence à décroître et que la tension croît.

Et alors, la variation de capacité entre les deux positions extrêmes ne pouvait être qu'assez faible.

La solution devait nous être donnée par l'emploi judicieux du dispositif connu sous le nom de *cylindre de Faraday.*

Considérons une enceinte E dans laquelle se trouve un cylindre de Faraday C et un corps c tous les deux chargés positivement, par exemple.

L'expérience montre que si le corps c est introduit dans le cylindre, il lui abandonne toute sa charge quelle que soit la différence de potentiel entre le cylindre et l'enceinte.

Cela signifie que la différence de potentiels entre le corps c et l'enceinte croît pendant ce déplacement au delà de toute limite.

Cela veut dire aussi que la capacité du corps c par rapport à l'enceinte tend vers zéro quand, à partir de sa position initiale, on le transporte à l'intérieur du cylindre.

La conséquence est que la différence de potentiels entre le cylindre et l'enceinte peut croître elle-même, si l'on répète, d'une façon continue, les charges et les décharges de *c*, au delà de toutes limites, ou, pour mieux dire, sans autre limite qu'une décharge disruptive entre le cylindre et l'enceinte.

L'emploi du cylindre de Faraday nous permettra donc d'obtenir, avec des dimensions acceptables, cette diminution considérable de capacité qui est indispensable pour atteindre de hautes tensions.

Donc, schématiquement, la machine se présente ainsi : le conducteur mobile *c* dans la position (1) est chargé, par rapport à l'enceinte,

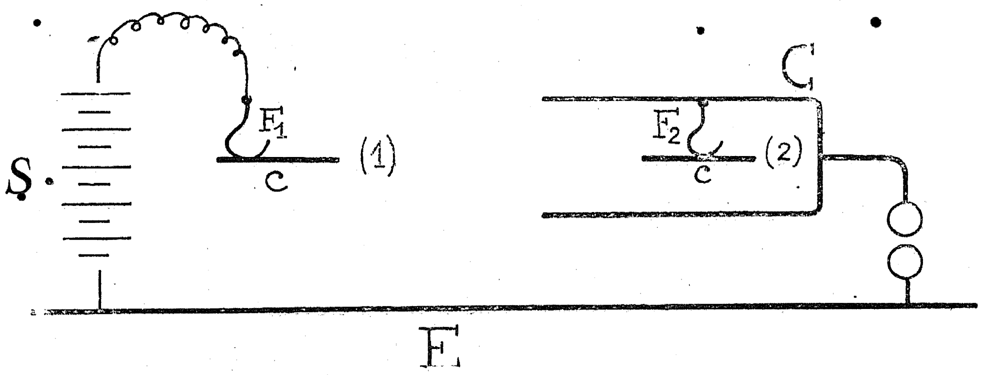


Fig. 3.

à l'aide de la source S et du frotteur F_1. Puis, par le jeu de la machine, il est amené à l'intérieur du cylindre de Faraday, auquel il abandonne sa charge au contact du frotteur F_2 (fig. 3). Il est ensuite ramené dans la position (1) où il se charge de nouveau, puis dans la position (2) pour sa décharge, et ainsi de suite.

On ne peut réaliser des cylindres de Faraday parfaits, c'est-à-dire parfaitement clos, puisqu'il faut pouvoir introduire et en sortir le corps *c*.

On sera conduit à leur donner la forme de portefeuilles qui joueront d'autant mieux leur rôle qu'ils seront plus étroits et plus profonds. Cette forme permettra facilement l'emploi de pièces tournantes sous forme de disques.

Des expériences préliminaires nous ont permis d'obtenir une tension finale qui pouvait atteindre jusqu'à 7 000 fois la tension initiale, ce qui justifie l'emploi du cylindre de Faraday.

Nous ferons une autre remarque avant de décrire le dernier type de machine réalisé.

Aux tensions élevées que l'on obtient, il est bien inutile d'employer des secteurs métalliques mobiles qui ne font que compliquer la construction et les difficultés d'isolement.

On peut compter sur une conductibilité superficielle suffisante pour recueillir toute la charge, même si les frotteurs des portefeuilles ne brossent qu'une partie de la surface chargée.

Dans nos réalisations préalables, nous avions un disque d'ébonite contenant un grand nombre de secteurs conducteurs. Nous avons pu, en partant de charges initiales sous 110 volts, atteindre 175 000 volts. La tension était multipliée par 1 600, mais nous avons obtenu le facteur 7 000 par la suite.

Je passe maintenant à la description sommaire du type de machine auquel nous nous sommes arrêtés et que vous avez là sous les yeux.

Un disque d'ébonite de 46 cm de diamètre peut passer successivement, dans son mouvement, en regard de deux chargeurs A et B diamétralement opposés, puis, à 90° des chargeurs, entre les parois de deux portefeuilles collecteurs.

Les chargeurs sont reliés aux deux pôles d'une source à courant continu qui pourrait déjà donner une tension élevée.

En coupe, ces chargeurs présentent un disque métallique soigneusement enrobé d'isolant sur toutes ses faces.

On a trouvé avantageux de recouvrir le disque métallique d'un mica sur la face qui regarde le plateau mobile (fig. 4).

En regard des chargeurs, de l'autre côté du plateau mobile, se trouvent de petites brosses métalliques qui sont reliées entre elles.

Le disque métallique du chargeur et la surface arrière du plateau, forment ainsi un condensateur qui se charge pendant le mouvement de rotation du plateau.

La partie du plateau ainsi chargée pénètre, dans son mouvement, un quart de tour après, dans un cylindre de Faraday qui est, lui aussi, soigneusement recouvert d'ébonite à l'extérieur.

A l'intérieur de ces cylindres de Faraday, qui ont la forme de portefeuilles, se trouvent de petites brosses métalliques qui recueillent les charges apportées par le plateau.

Les deux collecteurs sont ainsi de polarités différentes et constituent les deux bornes de la machine.

On peut les relier ou non, à volonté, comme dans la machine de Wimshurst, à un ensemble de deux condensateurs en série.

Ce dispositif diffère un peu, dans son principe, de la première con-

ception où la source d'excitation fournissait périodiquement une charge initiale et une énergie initiale que la machine avait pour but de multiplier.

Ici, on ne demande à la source excitatrice que de produire un champ.

Une telle machine peut être auto-excitatrice. Il suffit, une fois la

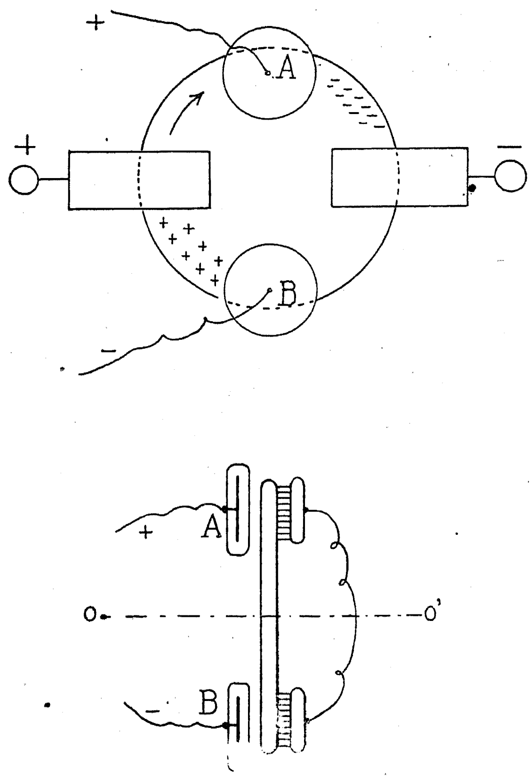


Fig. 4.

machine amorcée, de relier les deux bornes aux chargeurs par un conducteur médiocre. Une simple ficelle joue ce rôle très convenablement.

Grâce à la présence dans les chargeurs d'une lame de mica qui possède des propriétés rémanentes remarquables, la machine peut rester chargée plusieurs jours et se réamorcer d'elle-même.

Résultats obtenus.

Avec cette machine à un seul disque de 46 cm de diamètre, tournant à la vitesse de 1 600 tours par minute, nous avons obtenu des

étincelles de 32 cm entre boules de 26 cm de diamètre, ce qui, d'après les travaux de PEEK, correspond à une différence de potentiel dépassant un peu 500 000 volts et, avec des boules de plus petit diamètre, nous avons obtenu des étincelles de 65 cm de longueur, ce qui est la plus longue étincelle obtenue avec la plus grande machine de Holtz réalisée.

C'est là un plafond, car, à ces tensions excessives, nos diélectriques claquent fréquemment. Les décharges par effluves à travers l'air font que la machine alimente à peu près uniquement ses pertes intérieures et que la puissance utilisable est sensiblement nulle.

Nous ne marcherons pas dans ces conditions ce soir. En nous tenant au-dessous du plafond, nous avons déjà un régime assez impressionnant d'étincelles à une tension très voisine de 300 000 volts avec boules de 11 cm de diamètre.

Entre ces boules, une étincelle de

3,5 cm	correspond à	100 000 V
5 cm		150 000 V
9,5 cm		200 000 V
15 cm		250 000 V
26 cm		300 000 V.

La machine de Wimshurst, du Conservatoire National des Arts et Métiers, a des plateaux de 47 cm de diamètre ; leur vitesse angulaire est de 600 tours/minute, ce qui donne une vitesse relative double car ils tournent en sens inverse ; le plafond est à 120 000 volts environ à puissance nulle.

Si l'on réduit la tension de cette machine de Wimshurst à 70 000 volts, ce qui correspond sensiblement, d'après nos essais, à sa puissance utile maxima, cette puissance a été de 0,7 watt.

Avec notre machine, nous avons obtenu 24 watts sous 200 000 volts, mais sous un régime pas encore très stable. Mais nous n'en sommes qu'au début de notre course à la puissance.

Nous nous sommes efforcés, jusqu'à présent, d'obtenir les tensions les plus élevées possibles en faisant la chasse aux pertes intérieures par effluves.

Il nous a paru que ce premier résultat, par comparaison avec une machine de Wimshurst d'un type courant, à savoir une tension 3 fois plus élevée et une puissance 34 fois plus grande, valait la peine de vous être présenté.

Dans son livre sur les machines électriques à influence, édition de 1892, John GRAY indique que la plus puissante machine de Wimshurst,

réalisée en 1884, avait des plateaux de 2,10 m de diamètre, pesant chacun 128 kg et avait pu donner 35 cm d'étincelle dans des conditions non indiquées. Or, nous en sommes à 65 cm avec 1 100 gr. de pièces tournantes.

Que pourrons-nous faire comme puissance ? C'est le secret de demain.

La machine de Wimshurst est la seule à l'abri des phénomènes d'inversion encore assez obscurs et que présentent les autres machines électrostatiques.

Nos expériences préliminaires nous permettent d'escompter qu'avec une machine du genre de Wimshurst, mais judicieusement conçue avec nos portefeuilles collecteurs, nous pourrons très probablement obtenir 120 watts avec 2 kg de pièces tournantes.

Il nous suffira ensuite, comme nos prédécesseurs l'ont fait, de multiplier le nombre des plateaux pour obtenir des puissances intéressantes.

Nous avons déjà vérifié que le débit était proportionnel à la vitesse et à la tension de charge. Nous pouvons augmenter la vitesse ; nous pouvons accroître le diamètre des plateaux. Nous l'avons fait déjà et nous avons vérifié que nous pouvions gagner environ 20 000 volts pour un accroissement du diamètre de un centimètre.

Tout ceci est assez encourageant. Et si les travaux des mois qui vont suivre justifient notre confiance, vous en serez les premiers prévenus.

APPLICATIONS DE L'ÉLECTRICITÉ A L'ÉTUDE DE L'ISOLEMENT PHONIQUE DES MATÉRIAUX ET DES BATIMENTS (1)

par M. J.-F. Cellerier,

Directeur du Laboratoire d'essais du Conservatoire National des Art: et Métiers.

I. Les bruits dans la vie moderne. — II. Eléments constitutifs du bruit. — III. Courbes d'audibilité. — IV. Rappel des études récentes sur l'acoustique des constructions. — V. Etude expérimentale de l'isolement phonique des matériaux ; appareils utilisés. — VI. Définition du facteur de transmission phonique. — VII. Influence de la fréquence. — VIII. Premiers résultats indicatifs. Etude des qualités d'écoute d'une salle. Etude de la perception des bruits divers à l'intérieur d'une salle ; origine et transmission des bruits ; expériences sur l'isolement phonique des bâtiments ; analyse du bruit dans un central téléphonique automatique ; mesure de l'isolement acoustique des organes en vibration.

I. — Les Bruits dans la Vie moderne.

Les progrès réalisés dans les diverses branches de l'activité humaine s'accompagnent, malheureusement parfois, de quelques inconvénients. C'est ainsi que l'augmentation toujours croissante du nombre des machines, des véhicules, des instruments plus ou moins agréablement sonores, a pour conséquence d'intensifier de plus en plus les bruits de l'usine, de la rue, de l'habitation.

Or, tandis que la ville moderne tend ainsi à devenir une sorte de « Cité Métropolis », nos constructeurs s'ingénient à nous édifier des bâtiments à charpentes en fer ou en béton armé, cloisonnés par des « simili-murs » ou des « hourdis » aussi minces que possible, en sorte que les bruits se propagent en toute facilité, au détriment de la tranquillité de chacun des habitants.

Dans certains pays, particulièrement soumis à ces inconvénients, on se préoccupe de rechercher les moyens de les atténuer. En France, l'initiative en a été prise par le Touring-Club de France, qui a constitué une Commission spéciale de la « Lutte contre le Bruit » et dont

(1) Ce rapport, présenté à la séance mensuelle du 3 juin 1931, sera discuté à la Semaine de Discussions de novembre 1931.

les premiers effets se sont manifestés par des réglementations dont l'efficacité se manifeste.

En Amérique, il a été créé la « Noise Abatement Commission » qui a entrepris, dans ces dernières années, à New-York, une série d'expériences et dont les résultats viennent d'être publiés. M. Houllevigue a récemment rappelé dans *Le Temps*, certaines observations relevées sur une équipe de dactylos, hommes et femmes, travaillant alternativement en silence ou sous l'impression de bruits comparables à ceux que l'on entend dans les rues des grandes villes américaines.

La Commission américaine a constaté, en premier lieu, qu'en régime bruyant, le temps nécessaire pour accomplir une tâche déterminée (copier une lettre), était accru de 4,3 pour 100, chiffre à la vérité assez faible, et que les fautes de copie étaient plus nombreuses pour les dactylos les plus lents et moindres pour les plus expéditifs, vraisemblablement plus impressionnables aux causes extérieures. En second lieu, la Commission, tenant compte des échanges respiratoires, a enregistré que ceux-ci s'accroissent en moyenne de 19 pour 100 sous l'action du bruit. On peut donc conclure raisonnablement que, si certains parviennent à travailler aussi bien avec ou sans bruit, en revanche, tous se fatiguent davantage dans le bruit.

Quant à la répartition globale des principaux facteurs qui interviennent dans les bruits produits dans certains quartiers des grandes cités américaines, elle est la suivante :

Classification globale des bruits de New-York.

Trafic (camions, trompes d'automobiles, motocyclettes, etc...)	36,28 pour 100
Transports (métro, tramways)	16,29 pour 100
Radio (hauts-parleurs, etc...)	12,34 pour 100
Voitures de livraison (lait, glace, etc...)	9,25 pour 100
Locomotives, remorqueurs, navires	8,28 pour 100
Construction (riveteuses, perforatrices, etc...)	7,40 pour 100
Voix (causerie, crieurs de journaux, chiens)	7,27 pour 100
Divers	2,89 pour 100
	100,00

On y remarque, en particulier, la proportion vraiment exagérée

des bruits causés par les divers moyens de transports, ainsi qu'un certain abus de l'usage des haut-parleurs.

A titre comparatif, nous donnons ci-après les chiffres obtenus par M. Flechter aux « Bell Telephone Laboratories », de la puissance moyenne d'émission des sons, pour un Américain moyen parlant sa propre langue :

1 000 microwatts		au maximum de la voix,
10	»	pour la voix normale,
1/10e	»	à voix mi-basse,
1/1000e	»	pour un très faible murmure.

Ces chiffres peuvent évidemment varier beaucoup suivant les personnes. Il a été constaté, à cette occasion, que la puissance d'émission est plus grande dans la langue maternelle que dans les autres langues.

Ainsi donc, par l'excès même du progrès, les bruits divers des machines ou instruments prennent, dans la vie moderne, une importance de plus en plus considérable et abusive, en sorte que l'homme risque de trouver de moins en moins, dans son « home » ou dans son bureau, le repos compensateur du travail, s'il n'est pas pris des mesures de défense contre le bruit.

II. — Du Bruit.

Et tout d'abord, qu'entend-on par « bruit » ?

Lorsqu'un instrument ou un chanteur émet une note musicale, celle-ci est, ainsi qu'on le sait, composée d'un « son fondamental » et de « sons harmoniques » de celui-ci. Chacun de ces sons est simple et est caractérisé par le nombre de vibrations dans un temps donné ou *fréquence*, et par la grandeur de la vibration ou *amplitude*. La fréquence et l'amplitude définissent respectivement ce que l'on désigne en langage musical par la *hauteur* et *l'intensité* du son. Les fréquences des harmoniques successifs sont des multiples successifs de celles du son fondamental ; quant à l'intensité, elle dépend pour un instrument donné, de la puissance avec laquelle on produit le son. C'est la présence des harmoniques, en proportions variables pour chaque organe émetteur de sons, qui caractérise le « timbre » spécial à cet organe.

Si plusieurs organes émetteurs de sons fonctionnent dans le même temps, l'effet complexe, produit à un moment donné par l'ensemble des sons simples (fondamentaux et harmoniques) émis par chacun

d'eux, constitue un « bruit ». Les combinaisons heureuses de ces sons permettent à l'auditeur d'éprouver d'agréables sensations, et c'est dans leurs variétés que consiste l'art musical. Tout au con-

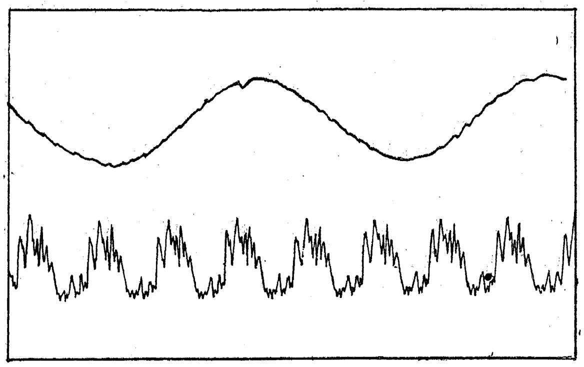


Fig. 1. — Courbe représentative du son complet émis par un avertisseur d'automobile (régime continu).

traire, les excès de puissance ou les combinaisons mal réglées font éprouver des sensations auditives plus ou moins désagréables ; ce sont ces derniers défauts qui doivent surtout être évités.

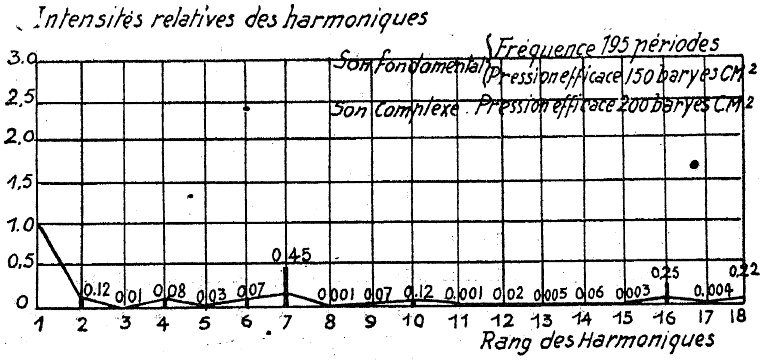


Fig. 2. — Intensités relatives des harmoniques du son émis par un avertisseur d'automobile.

Bien que l'on attribue à l'oreille la faculté de se comporter comme une série de résonnateurs pour les sons simples, celle-ci *non spécialement éduquée* perçoit difficilement les divers harmoniques et, en tous cas, ne saurait généralement pas analyser tous les multiples éléments qui constituent un son complexe ou « bruit ».

Dans une étude antérieure (1), nous avons pu séparer les divers

(1) Communication à l'Académie des Sciences le 23 décembre 1929.

harmoniques émis par un avertisseur sonore et déterminer, pour chacun d'eux, la grandeur de l'amplitude, soit comparée à celle du son fondamental, soit en *valeur absolue* rapportée à l'unité de pression.

Nous reproduisons, ci-après, la courbe représentative du son émis par un modèle de trompe d'automobile soumis à un régime continu d'émission, ainsi que la puissance de chacun de ses 18 premiers harmoniques (fig. 1 et 2).

Cet exemple, sur un cas simple, fait ressortir le degré de complexité du problème de l'analyse d'un bruit, surtout dans le cas où celui-ci est produit par différentes sources sonores, elles-mêmes d'ailleurs plus ou moins bien définies.

III. — Courbes d'audibilité.

Avant de décrire le procédé expérimental adopté pous nos diverses études, nous pensons utile de résumer brièvement l'état actuel de la question de la sensibilité auditive.

L'oreille, au-dessous d'une certaine excitation, ne fournit plus de sensations d'audibilité.

La loi de Fechner admet que la sensation S varie comme le logarithme de l'excitation E :

$$S = S_0 \log \frac{E}{E_0}$$

d'où :

$$\Delta S = S_0 \frac{\Delta E}{E}$$

E_0 définit le seuil de la perception.

La valeur absolue des excitations n'a pu, jusqu'à ce jour, être mesurée, en sorte que c'est seulement la seconde formule que l'on peut espérer pouvoir vérifier, en prenant pour l'excitation E une quantité proportionnelle à l'énergie mécanique.

Or, il a été constaté que cette énergie dépendait de la fréquence. Dans ces derniers temps, en effet, Flechter et Wegel ont pu établir, au Bell Telephone Laboratories, la courbe des pressions par cm^2 limites des sons audibles, pour les diverses fréquences. D'autre part, on a pu obtenir également la courbe donnant les valeurs limites des pressions au delà desquelles la perception physiologique n'existe plus et est remplacée par une véritable souffrance de l'oreille.

La variation des pressions (dynes par cm^2) dues aux vibrations sonores étant considérable, les courbes d'audibilité maxima et minima

ont été établies en fonction des fréquences et des logarithmes des pressions efficaces.

Pour qu'un son soit perceptible à l'oreille (supposée moyenne), le point représentatif de la pression doit être situé à l'intérieur de la surface limitée par les deux courbes ci-dessus. C'est donc dans ces limites que devront fonctionner les appareils destinés aux expériences pour que l'on obtienne des résultats observables (fig. 3).

D'autre part, il résulte de la mesure des intensités sonores par la méthode des scintillations, employée par M. Canac, que le rapport

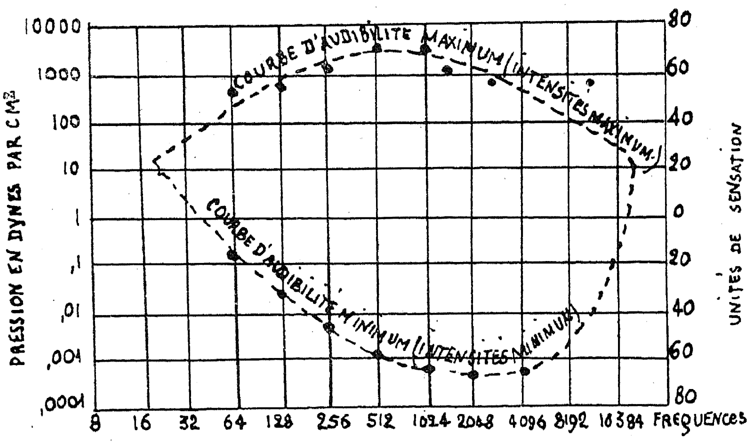


Fig. 3. — Courbes d'audibilité minima et maxima (Flechter et Wegel aux Bell Telephone Laboratories).

$\frac{\Delta I}{I}$ est à peu près constant (loi de Fechner) et égal à quelques centièmes. Il croît quand l'intensité diminue ; il est à peu près indépendant de la fréquence. En outre, le rapport $\frac{\Delta I}{I}$ correspondant au plus grand accroissement relatif d'un son discernable à l'oreille, est toujours petit et égal à quelques centièmes, si l'on a soin d'opérer dans des conditions bien déterminées de variation continue des sons et d'absence de bruits parasites. Il commence d'abord par diminuer quand l'intensité du son augmente, puis il croît ensuite légèrement pour les sons très forts. Il varie d'une expérience à l'autre pour un même individu, toutes choses égales d'ailleurs.

Enfin, il résulte de nos expériences signalées plus haut, effectuées sur des avertisseurs sonores, que la « pression efficace » relevée à une distance de 10 cm pour un fondamental ou un harmonique peut atteindre et même dépasser 1 000 baryes, et que la précision auditive

est de l'ordre de quelques baryes, résultats qui confirment ceux de FLECHTER (2 baryes environ).

Si l'on considère que la pression atmosphérique est d'environ un million de baryes, on se rend compte de la sensibilité de l'oreille.

La variation des puissances étant très considérable, il est particulièrement commode d'utiliser une échelle logarithmique dont l'unité pratique, proposée par les Américains, porte le nom de « *décibel* » et correspond à la plus petite variation sonore, perceptible par l'oreille moyenne ; on peut lui reprocher d'être un peu imprécise.

Avec cette nouvelle unité, le niveau le plus élevé correspond à + 20 décibels, le plus bas correspond à — 40 décibels.

Le degré d'appréciation comparative des intensités est estimé à 5 pour 100 lorsque le même opérateur opère dans les mêmes conditions expérimentales et pathologiques ; ce chiffre peut s'élever à 10 et 15 pour 100, suivant que ledit opérateur est plus ou moins bien disposé d'un jour à l'autre, et il peut atteindre et même dépasser 50 pour 100 en passant d'un observateur à l'autre.

De l'ensemble de ces considérations, il apparaît donc que, pour les estimations précises des intensités des sons, il soit avantageux de substituer à la méthode directe par audition à l'oreille des procédés de mesures rigoureux, tels que ceux utilisant des appareils électriques sensibles.

Sans doute, l'intensité physiologique d'un son n'a rien de commun avec son intensité mécanique, qui est celle que nous déterminons. Néanmoins, comme nous nous plaçons pratiquement pour chaque série d'expériences dans des limites d'intensités relativement peu étendues de sons de même fondamental et de même timbre, et avec le même dispositif de réception microtéléphonique, nous pouvons admettre, dans ces limites, la loi de Fechner.

IV. — RAPPEL DES ÉTUDES RÉCENTES DE L'ACOUSTIQUE DES CONSTRUCTIONS.

La détermination des divers facteurs susceptibles de caractériser les constructions en ce qui concerne leur acoustique exige, pour être complète :

1° *L'étude des matériaux employés* dans les constructions au point de vue de leur plus ou moins grande aptitude à l'isolement phonique ;

2° *L'étude des salles des bâtiments* au point de vue :

a) de la résonance phonique des bruits émis à l'intérieur même (conférencier, orchestre, machines, etc...)

b) de la perception à l'intérieur des bruits provenant de l'extérieur.

Certaines de ces recherches ont déjà été entreprises dans divers pays.

M. le Professeur KRUEGER, de Stockholm, a effectué en 1927, de nombreuses déterminations sur l'isolement des cloisons au bruit, particulièrement sur les combinaisons des cloisons en bois, en utilisant un haut-parleur et un microphone récepteur.

Le Professeur MOENS, de Gand, a recherché le coefficient par lequel il faut multiplier l'intensité sonore émise directement par un instrument pour reproduire la même intensité après passage au travers d'une paroi.

Signalons, à cette occasion, les intéressants travaux de M. GRUTZMAKER, présentés à la Société des Physiciens de Kissingen (Allemagne), sur une nouvelle méthode d'analyse des sons, de M. GERLACH, également en Allemagne, et des Américains C.-H. HOORE, A.-S. CURTIS et LANDREW, études basées sur la superposition de fréquences destinées à fournir des sons purs.

En France, M. Gustave LYON, qui a fait réaliser de considérables progrès dans la question de l'isolement phonique des bâtiments, a utilisé, pour l'étude des salles de concert des Etablissements Pleyel, un phono-baromètre fournissant des valeurs relatives des intensités sonores en divers points d'une salle.

Notre collègue, M. Pierre DAVID, a fait, en 1930, au Conservatoire des Arts et Métiers, une très intéressante conférence sur les rapports de l'acoustique moderne et de l'électricité.

M. KATEL a présenté, à l'Association française pour l'Essai des Matériaux (Janvier 1931), une étude sur « l'Isolement phonique et l'Acoustique des Bâtiments » où il signale l'importance de la question et indique des précautions à prendre, à cet égard, dans la construction

Au cours de l'année 1930, le Touring-Club de France, préoccupé des inconvénients de plus en plus considérables dus aux bruits, a institué une Commission spéciale de la « Lutte contre le Bruit », et a ouvert une « information » en vue de déterminer, dans des conditions comparables, les meilleurs matériaux isolants contre le bruit. En outre de la détermination des caractéristiques d'isolement phonique, cette étude comporte la recherche du coefficient de

conductibilité calorifique, la détermination de la résistance mécanique, de la résistance au feu, à la gelée, etc.., caractéristiques susceptibles de fournir d'utiles renseignements pour les applications à la construction.

Ces diverses expériences ayant été confiées au Laboratoire d'Essais du Conservatoire National des Arts et Métiers, nous avons été ainsi conduit à rechercher une méthode aussi précise que possible, fournissant des résultats dans des *conditions nettement définies d'émission des sons*. Les résultats pourront ainsi être comparés entre eux en toute connaissance de cause.

Or, à ce point de vue important, il y a lieu de remarqur que les expériences à ce jour connues, n'ont pas suffisamment tenu compte de la différence essentielle qui existe entre un « bruit » et un « son simple », ce qui explique, en partie, les résultats relativement différents obtenus par les divers expérimentateurs.

En outre, pour que cette étude puisse servir de base à des observations et conclusions sur la transmission des sons au travers des matériaux, il est nécessaire qu'elle soit effectuée en produisant, à volonté, des sons graves ou aigus, faibles ou intenses.

Pour ces divers motifs, nous avons cherché à émettre des séries de « sons simples », de tonalités variant du « grave » à « l'aigu », et d'intensités passant du « pianissimo » au « forte », chacun d'eux étant bien défini par une fréquence et une amplitude déterminées.

V. — Etude expérimentale de l'Isolement phonique des Matériaux.

Pour des motifs de précision dans les mesures, exposés plus haut, l'étude a été réalisée par l'utilisation de procédés électriques de grande sensibilité. A cet effet, nous avons constitué un dispositif d'émission de sons purs et un dispositif de réception après leur passage au travers du matériau étudié.

a) Le *dispositif d'émission* des sons comprend :
Un oscillateur,
Un amplificateur de puissance,
Un filtre de sélection,
Un diffuseur électrodynamique.

L'*oscillateur* se compose d'un diapason dont les branches sont placées entre deux électro-aimants, et d'une lampe à trois électrodes dont la grille est reliée à la bobine de l'un des électros, et la plaque

à l'autre bobine (fig. 4). Le diapason est choisi parmi ceux de la collection des étalons du Laboratoire d'Essais, fabriqués en acier spécial, et qui fournissent des sons d'une relativement grande pureté.

L'*amplificateur de puissance*, pourvu de lampes appropriées, est du type couramment employé en téléphonie ou en T. S. F. pour l'amplification des courants modulés ou alternatifs de basse fréquence.

Le *filtre de sélection* se compose de condensateurs et d'inductances réglables; il peut être monté, soit en série, soit en parallèle, pour

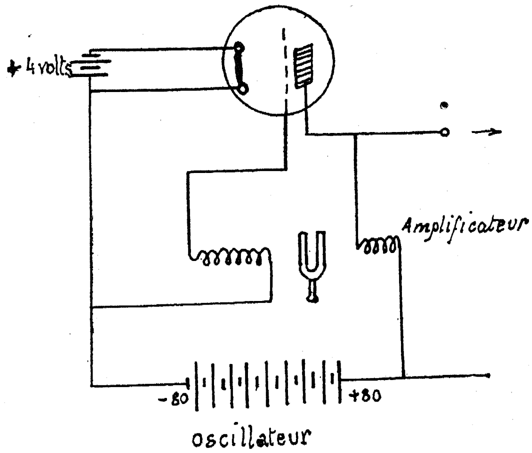


Fig. 4. — Etude de l'isolement phonique des matériaux (schéma de l'oscillateur).

sélectionner le son simple qu'on veut utiliser : en principe, on choisit le son fondamental du diapason, et on « étouffe » les autres, constitués d'ailleurs de quelques harmoniques peu intenses du diapason étalon et de parasites que peut créer l'amplificateur.

Le *diffuseur électrodynamique*, de construction très soignée, est choisi comme particulièrement fidèle entre les limites des fréquences pour lesquelles on opère.

Il est installé à une distance déterminée de la paroi du matériau (1) à étudier.

Le réglage de la grandeur de l'amplitude des vibrations émises (du « pianissimo » au « forte ») est réalisé en agissant soit sur l'amplificateur, soit sur l'excitation du haut-parleur.

(1) L'expression « matériau » a été introduite, à tort semble-t il, depuis quelques années dans la technique de la construction. Avec M. Blondel nous estimons, si le singulier du substantif « matériaux » doit être introduit dans le vocabulaire technique que c'est « material » qui serait à adopter (note de l'auteur).

Bien entendu, toutes précautions sont prises pour l'isolement des pièces contre les bruits extérieurs et contre les vibrations des organes.

Avant toute expérience, il faut s'assurer que les sons ainsi émis à l'aide de ce dispositif sont pratiquement « purs ». A cet effet, nous avons utilisé le montage que nous avions réalisé pour l'étude des harmoniques des sons, en branchant le circuit électrique émetteur sur

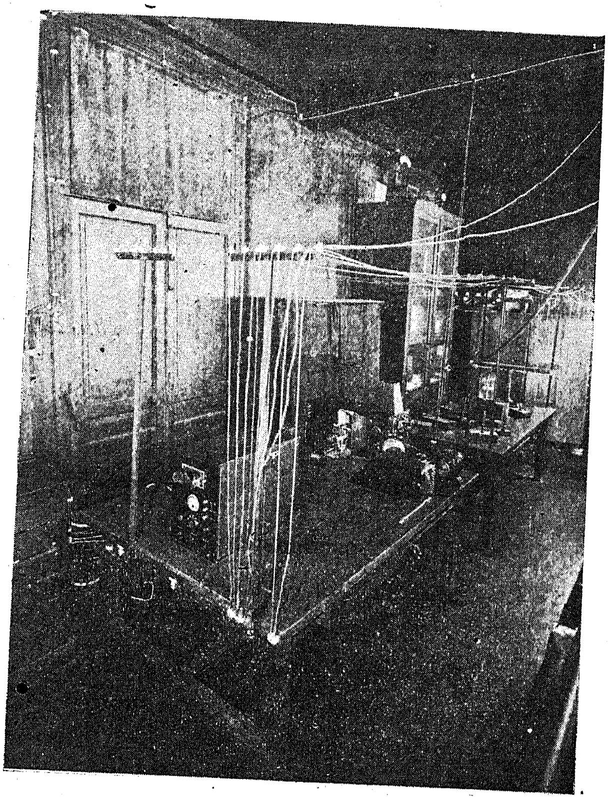


Fig. 5. — Laboratoire de contrôle de la pureté des sons.

un oscillographe Blondel de haute précision, ou sur un oscillographe à rayons cathodiques. La courbe représentative doit être une sinusoïde, fait qui a été contrôlé (fig. 5).

b) Le *dispositif de réception* des sons comprend :

Une cabine,

Un microphone récepteur,

Un amplificateur de puissance,

Des appareils de mesures.

La *cabine* comprend plusieurs chambres isolantes intérieures les unes aux autres, dont les cloisons sont constituées par des matériaux

particulièrement isolants du son, et forment une série « d'anneaux de garde ». L'une des faces de la chambre intérieure comporte une fenêtre circulaire de 15 cm de diamètre, sur laquelle on peut fixer un panneau carré de 50 cm de côté du matériau à essayer (fig. 5) et d'épaisseur déterminée. On prend toutes précautions pour éviter qu'aucune introduction de sons parasites ne soit possible. Une expérience spéciale permet de s'assurer, préalablement à toute expérience, que la cabine ainsi constituée ne laisse passer aucun son appréciable.

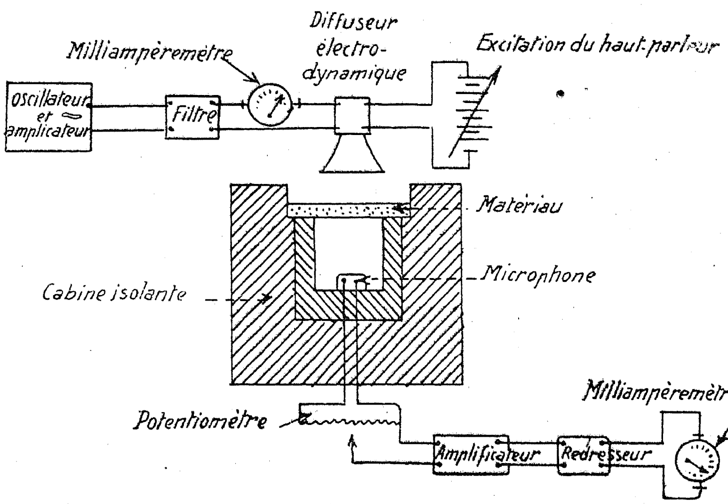


Fig. 6. — Étude de l'isolement phonique des matériaux (schéma de l'installation d'ensemble).

Le microphone récepteur électromagnétique est très sensible et pratiquement dépourvu de résonance entre les limites des fréquences utilisées pour les expériences. Il est placé dans la chambre intérieure, le pavillon tourné vers la fenêtre et à une distance invariable. Ce microphone peut, éventuellement, être monté avec une lame de quartz piezo-électrique et être étalonné en pressions efficaces par la méthode du thermophone à feuilles d'or de E.-C. Wente, ainsi qu'il a été opéré pour nos études antérieures d'appareils sonores (fig. 6).

Sur les conseils de M. Gall, de l'Etablissement Central du Matériel de la Radiotélégraphie Militaire, nous nous proposons de substituer au microphone électromagnétique dont nous disposons, un microphone électrostatique, dont les courants varient linéairement avec les puissances sonores, ce qui augmentera la précision des résultats.

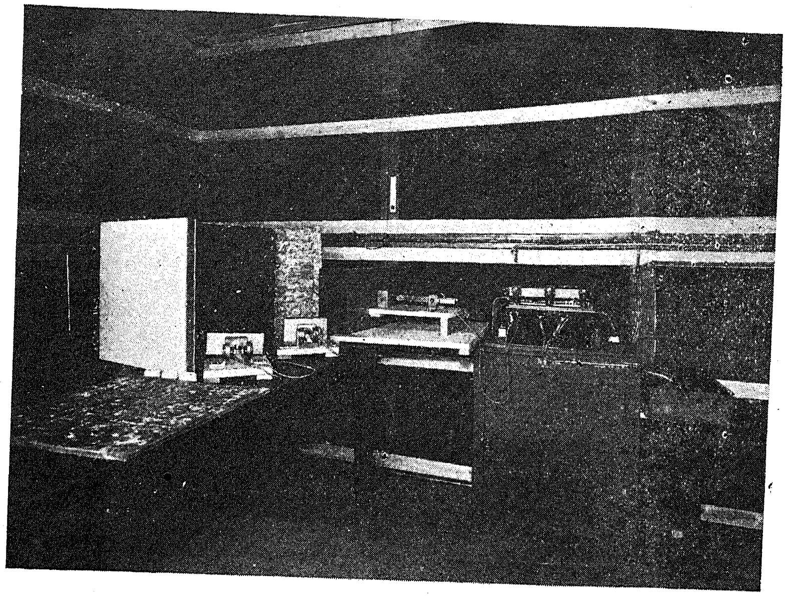


Fig. 7. — Vue du laboratoire d'études d'isolement phonique des matériaux (oscillateur et filtre).

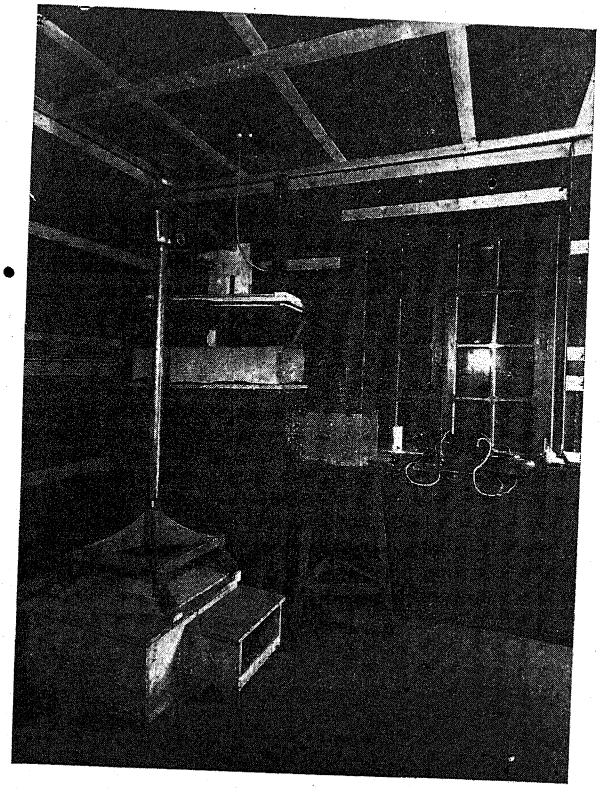


Fig. 8 — Vue du laboratoire d'études d'isolement phonique des matériaux (haut-parleur, cabine et dispositif de réception).

L'*amplificateur de puissance* est, comme celui de l'émission, d'un modèle soigné, du genre de ceux utilisés en radiophonie.

Les *appareils de mesures* comprennent, en outre d'un redresseur de courant, un milliampèremètre et un potentiomètre pouvant fournir divers degrés de sensibilité suivant l'importance du courant microphonique.

Avant toute expérience, on s'est assuré avec l'oscillographe que le courant de réception était sinusoïdal, et correspondait avec une fidélité satisfaisante aux sons émis (fig. 7 et 8).

Bien entendu, toutes précautions doivent être prises pour isoler des bruits parasites la salle même où s'effectuent les expériences, la cabine, le potentiomètre, etc.

Le dispositif expérimental décrit ci-dessus a été réalisé au Laboratoire d'Essais du Conservatoire des Arts et Métiers, avec le concours de nos collaborateurs du Service des essais de Physique du Laboratoire : M. Lecarme, Chef du Service, et MM. Rouquayrol, Assistant-Chef et Heyberger, Assistant, anciens élèves de l'Ecole Supérieure d'Electricité, et dont je me fais un agréable devoir de signaler l'ingéniosité dans la mise au point minutieuse qu'exigent de telles expériences.

VI. — Facteur de Transmission phonique.

Soit i l'intensité efficace du courant parcourant le circuit récepteur après passage du son au travers du matériau (déterminée par l'appareil de mesures du dispositif récepteur).

Soit I l'intensité efficace du courant correspondant sans l'interposition du matériau (déterminée également par l'appareil de mesures).

En admettant la loi de Fechner comme exacte dans les limites des expériences, l'intensité sonore et l'énergie mécanique correspondante mise en jeu sont proportionnelles. Or, celle-ci est, ainsi qu'on sait, proportionnelle au carré de l'amplitude du courant sinusoïdal produit dans le circuit récepteur du microphone électromagnétique utilisé, c'est-à-dire au carré de l'intensité efficace du courant.

L'impédance du circuit récepteur pour un même son émis par le diffuseur étant constante, le coefficient de proportionnalité K est le même, en sorte que l'on a :

Intensité sonore transmise $= Ki^2$

Intensité sonore directe $= KI^2$

On en déduit le rapport :

$$\sigma = \frac{\text{intensité sonore transmise}}{\text{intensité sonore directe}} = \left(\frac{i}{I}\right)^2.$$

Dans le cas où l'on utilise un microphone électrostatique, les courants microphoniques j et J sont proportionnels aux intensités sonores, et l'on a :

$$\sigma = \frac{j}{J}.$$

C'est ce rapport σ qui caractérise l'isolement phonique du matériau pour un son de fréquence et d'amplitude déterminées, et que nous proposons de désigner sous l'appellation de *facteur de transmission phonique*.

VII. — Influence de la Fréquence.

La formule de Rayleigh donne (théoriquement) l'intensité efficace i du son transmis au travers d'un matériau homogène, à l'intensité I du son émis. Cette formle simplifiée peut être représentée par :

$$i = I \frac{1}{1 + \left(\frac{C}{\lambda}\right)^2}$$

λ = longueur d'onde.
C = constante du corps étudié et du milieu.

On en déduit que i est d'autant plus élevé que la longueur d'onde est plus grande ou, en d'autres termes, qu'après passage au travers d'un milieu homogène, les sons graves ont plus de puissance que les sons aigus (toutes choses égales d'ailleurs).

Dans la pratique, les matériaux ne sont pas homogènes ; ils contiennent des pores ou cavités cellulaires en plus ou moins grande quantité, formant parfois des canaux communicants susceptibles de modifier profondément la transmission. De plus, certains sont fabriqués par couches successives de matières différentes.

Il en résulte que l'observation de Rayleigh ne se vérifie pas forcément, et qu'il est nécessaire, pour chaque matériau, de procéder à de multiples expériences, portant non seulement sur des fréquences diverses, mais également sur des intensités variées des sons.

Les graphiques que nous reproduisons à titre d'exemple (fig. 9), relatifs à quatre panneaux de matériaux, fournissent les valeurs du coefficient σ pour des sons graves (ut_2), moyens (la_3), relativement aigus (sol_4), et émis avec des intensités faibles, moyennes ou fortes.

On constate, tout d'abord, que, quel que soit l'intensité émise, les écarts de σ correspondant aux diverses fréquences, sont relativement constant, ce qui présente un certain intérêt pratique. D'autre part, on observe que, pour trois des échantillons, la valeur de σ est sensiblement supérieure pour la tonalité la_3 à celles des tonalités, soit

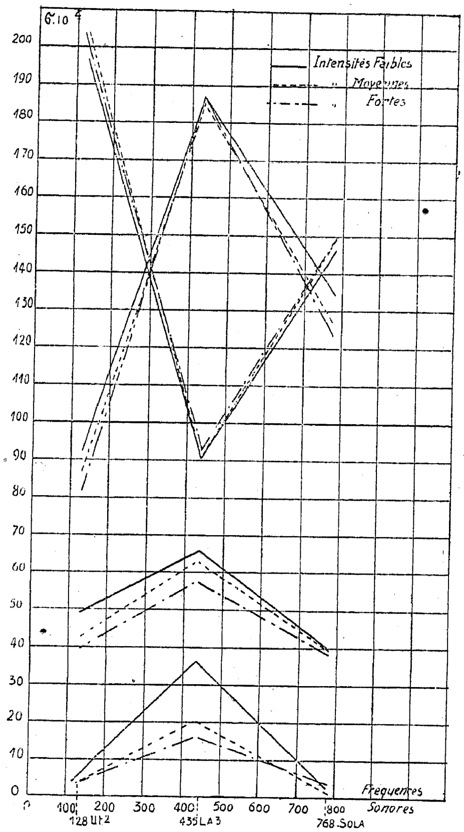


Fig. 9. — Exemple de graphiques de facteurs de transmission phonique.

plus graves, soit plus élevées. Pour le quatrième échantillon, c'est le contraire.

VIII. — Premiers résultats indicatifs.

Il paraît probable que certains phénomènes de résonance se produisent à l'intérieur même du panneau, entre les diverses couches ou même entre les pores.

C'est donc seulement à la suite d'une étude méthodique très minutieuse sur les divers matériaux, que l'on pourra déduire pour

chacun d'eux les meilleures conditions d'isolement acoustique, et c'est par la discussion de l'ensemble des résultats que l'on peut espérer formuler des règles précises sur la transmission des sons au travers de la matière.

Les expériences sont actuellement en cours sur une centaine de matériaux divers, en vue de la « consultation » demandée par le Touring-Club de France. Il serait prématuré d'en tirer dès aujourd'hui des conclusions ou des règles de la transmission phonique.

Toutefois, dès maintenant et à titre d'indication, nous pouvons signaler que :

1° Certains matériaux employés sous forme de *plaques homogènes*, tels que les lièges agglomérés, sans liant ne fournissent pas d'excellents résultats au point de vue de l'isolement contre les sons ;

2° Les *corps peu poreux* sont, toutes choses égales d'ailleurs, de meilleurs isolants que les corps poreux de même matière, contenant des vides en grand nombre communiquant entre eux avec l'extérieur;

3° La *variété dans la constitution des cloisons*, par exemple par plaques de matériaux différents, modifie très sensiblement les phénomènes de transmission et, à épaisseur égale, paraît améliorer sensiblement la qualité, par rapport à un seul des matériaux constituants ;

4° *Certaines pailles* (ou produits analogues) hachées, pilées, paraissent devoir donner de bons résultats ;

5° Le meilleur des matériaux isolants perd la plus grande partie de ses qualités lorsqu'il renferme des *parties métalliques*, surtout si celles-ci font communiquer les faces extérieures, etc...

IX. — Etude des qualités d'écoute d'une salle.

Il existe un certain nombre de règles pour la forme à donner aux parois d'une salle et pour l'aménagement intérieur de celle-ci, en vue d'obtenir une bonne écoute. Leur exposé sortirait du cadre de la présente communication, que nous limitons aux constatations des sons perçus en différents points de la pièce par des procédés électriques.

Pour cette étude, on crée des sons purs de diverses fréquences et amplitudes comme nous avons expliqué pour l'étude des matériaux, en choisissant le ou les points d'émission, suivant le but recherché (orchestre, tribune de l'orateur, etc...). On procède à l'exploration phonique dans les diverses régions de l'enceinte à l'aide d'un dis-

positif d'écoute constitué par un microphone récepteur et un potentiomètre et l'on détermine, par les méthodes décrites (ou d'analogues), les intensités sonores correspondantes en les comparant entre elles ou à une source sonore déterminée (fig. 10).

La comparaison avec une source sonore déterminée peut être effectuée en étalonnant à l'avance le potentiomètre récepteur en décibels par exemple, par rapport à des intensités successives de la source sonore choisie.

Pratiquement, on peut, au lieu d'émettre un son pur, se contenter d'utiliser un bruit aussi régulier que possible, par exemple celui d'une note continue émise par un instrument musical ou reproduite

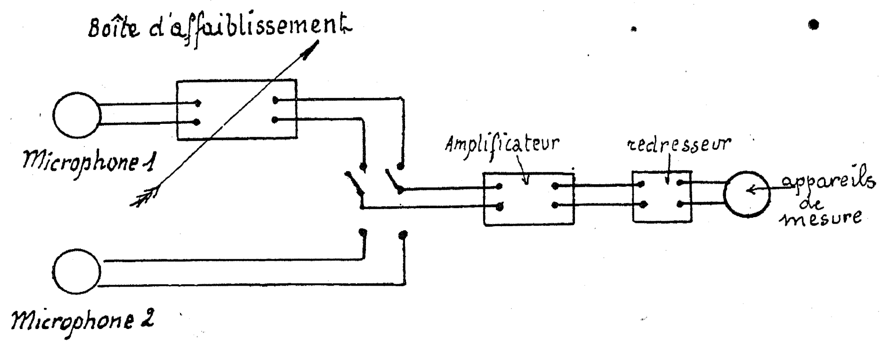


Fig. 10. — Dispositif expérimental d'études des qualités d'écoute d'une salle.

éventuellement par un disque enregistreur. Toutefois, nous faisons observer que cette façon de procéder ne saurait être qu'indicative, ainsi qu'il résulte de nos observations sur la distinction entre le son émis par un instrument et ses divers constituants simples (fondamental et harmoniques) et qu'on s'expose, en généralisant, à de graves erreurs.

Le dispositif complet, actuellement en montage au Laboratoire d'Essais du Conservatoire National des Arts et Métiers, est installé dans des caisses portatives pour le déplacement jusqu'au local à expérimenter. L'énergie électrique nécessaire au fonctionnement des appareils est fourni par le secteur ou, éventuellement, par des accumulateurs portatifs.

X. — Etude de la perception des bruits divers a l'intérieur d'une salle.

a) *Origine et transmission des bruits.*

Les bruits divers perçus à l'intérieur d'une salle ont pour origine d'émission :

Les *bruits directement émis dans la salle même* (paroles, musique, fonctionnement de machines, etc...).

Les *bruits provenant de l'extérieur* (de la rue, des locaux voisins, etc...).

Quant à la transmission de ces bruits jusque en un point donné de la salle, elle s'effectue d'une part *directement par l'air ambiant*, d'autre part par l'intermédiaire *des matériaux* constituant les murs, les cloisons, les poutres, les organes de liaison et dont quelques-uns possèdent des propriétés remarquables de facilité de transmission des vibrations sonores ou mécaniques.

On se rend ainsi compte de la complexité du problème à résoudre, en sorte qu'il ne saurait être question d'opérer avec des sons purs ; on se heurterait à des difficultés en quelque sorte insurmontables.

Aussi, dans la pratique, faut-il se borner à une « estimation d'ensemble » qui, si elle n'est pas exempte de critiques, est susceptible de fournir d'utiles indications comparatives. En outre, on s'efforcera de séparer chaque genre de bruit produit en « étouffant » les autres, de façon à procéder à la détermination de la relativité de grandeur des phénomènes acoustiques pour chaque cause de bruit.

b) *Expériences préliminaires.*

Les Services téléphoniques de Paris, sous la direction de M. Salomon, Ingénieur en Chef, ont utilisé récemment un dispositif qui leur a permis d'avoir des indications intéressantes sur les bruits provenant des divers organes de fonctionnement des Centraux automatiques. Le dispositif comportait, en principe, un microphone Solid Back, un amplificateur et un appareil de mesures avec voltmètre redresseur à oxyde de cuivre. D'autre part, ces Services ont également appliqué le principe de la transformation des vibrations d'un corps solide en vibrations électriques pour évaluer, à l'aide d'un *vibromètre*, dans des expériences préliminaires, la puissance des vibrations de machines.

c) *Expériences détaillées sur l'isolement phonique des bâtiments.*

Pour préciser la question assez complexe, en vue des mesures à prendre pour l'isolement phonique des bâtiments, nous avons, en collaboration avec les Services Téléphoniques de Paris et la Société « Le Matériel Téléphonique », récemment effectué une série méthodique d'essais. Ceux-ci ont consisté en :

1° *Examen et analyse du bruit dans une grande salle de Central automatique en fonctionnement.*

On a distingué, comme dit ci-dessus, les bruits transmis par les divers organes de liaison (arbres, montants, poutres, planchers, plafonds, canalisations) et ceux transmis directement par l'air (fig. 11).

Ces essais furent effectués de nuit pour mieux se rendre compte de l'importance et de l'acuité du bruit, en éliminant autant que possible ceux provenant de l'extérieur.

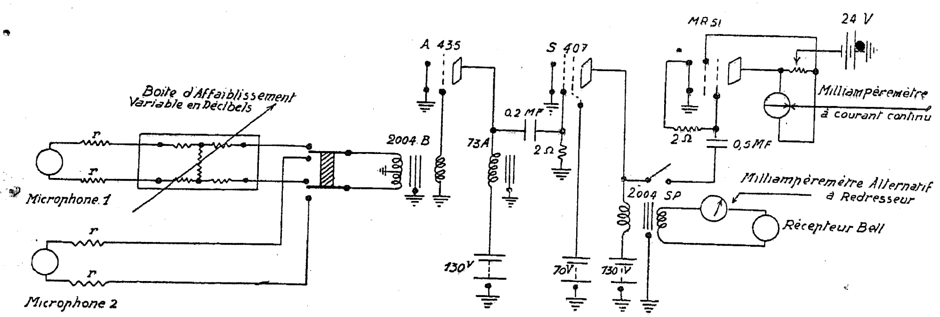


Fig. 11. — Schéma du dispositif d'étude de perception des bruits.

Pour l'étude du bruit provoqué par l'ensemble de la salle, chaque partie de la transmission fut examinée successivement, d'abord le moteur seul, puis le moteur accouplé à la commande centrale, aux arbres de rangées horizontaux et enfin aux arbres verticaux des baies. Le bruit était recueilli au moyen d'une « sonde phonique », constituée essentiellement d'un microphone électro-magnétique Bell que l'on pouvaitse déplacer sur le sol ou appuyer sur les murs ou sur les organes en mouvement; ce microphone était lui-même relié à un amplificateur à la sortie duquel se trouvait un récepteur servant à l'écoute.

On a pu ainsi déterminer la part de chaque organe de transmission des sons, ce qui a fourni de précieuses données pour l'isolement acoustique et vibratoire des machines, ainsi que les moyens d'améliorer les murs et parois au point de vue de leur isolement phonique.

2° *Mesure de l'isolement des organes en vibration protégés par un isolant.*

Celui-ci fut assimilé à un circuit téléphonique produisant un certain affaiblissement que l'on déterminait. A cet effet, un microphone

était placé sur le socle d'un moteur en marche accouplé à sa commande centrale et reposant sur le sol par l'intermédiaire du matériau à essayer. Un deuxième microphone était placé à même le sol et à une distance fixe du moteur, convenablement choisie. Chacun de ces microphones pouvait être relié à un amplificateur, celui placé sur le socle du moteur à travers une boîte d'affaiblissement variable graduée directement en décibels. A la sortie de l'amplificateur étaient placés les appareils de mesures, comme il a été expliqué. Il suffisait de régler l'affaiblissement de la ligne artificielle pour obtenir la même élongation pour les deux microphones, sous réserve toutefois, d'opérer avec la même source de bruit et une position bien définie pour chaque microphone.

Les chiffres obtenus ne sont d'ailleurs valables que pour les vibrations particulières dues à l'ensemble moteur et commande centrale. A titre d'indication, les valeurs d'affaiblissement obtenues varient entre 15 et 35 décibels.

En résumé, c'est grâce aux progrès réalisés dans ces dernières années par les applications de l'électricité, et notamment par la radiophonie, que l'on peut entreprendre des études méthodiques comparatives et suffisamment précises *des qualités d'isolement physique des divers matériaux*, en vue de la recherche de leur qualité d'isolement phonique, et également l'étude de *l'acoustique des enceintes* (salles de réunion, appartements, salles de cinéma, de concert, etc...), tant au point de vue de leurs qualités de diffusion des sons qui y sont émis qu'à celui de « défense » contre les bruits provenant de l'extérieur.

Déjà, d'intéressants progrès ont été réalisés dans ce sens, et il est permis d'espérer que la vulgarisation des nouvelles méthodes employées et des résultats obtenus contribuera à améliorer sensiblement les conditions de travail du personnel et celles du repos des habitants dans leur foyer.

SEMAINE DE DISCUSSIONS DE NOVEMBRE 1930

COMPTE RENDU STÉNOGRAPHIQUE DES DISCUSSIONS

Séance du Vendredi 28 Novembre 1930

(*Suite du Bulletin de Mai 1931, p. 527*).

6e SECTION. — RECHERCHES PHYSIQUES. — PHYSIOLOGIE. APPAREILS DE MESURE

SOMMAIRE

1re Discussion du rapport de M. ILIOVICI sur les tendances actuelles dans la construction et l'utilisation des transformateurs de mesure, p. 705. — M. ROSENFELD : remarque sur les appareils décrits ; transformateur à perméabilité moyenne constante; résistance aux courants de court-circuit; ouverture du circuit secondaire des transformateurs d'intensité, p. 705. — M. ILIOVICI : réponses aux remarques de M. ROSENFELD ; transformateurs compoundés, p. 712.

2e Discussion du rapport de M PILON sur les appareils de mesure dans l'industrie radiologique — Lettre de M. QUEYVRON, p. 715.

M. ILIOVICI présente son rapport sur *Les tendances actuelles dans la construction et l'utilisation des transformateurs de mesure* (1).

M. MAUDUIT. — Pourrait-on demander à M. ILIOVICI quelle précision on obtient avec les transformateurs de tension ?

M. ILIOVICI. — La précision habituelle à tous les points de vue. Pour le transformateur de tension c'est facile, parce qu'il travaille dans des conditions assez limitées ; c'est plus difficile avec le transformateur de courant, c'est franchement en-dessous, mais il satisfait aux conditions du Syndicat.

M. ROSENFELD. — Le très intéressant exposé de M. ILIOVICI peut laisser néanmoins quelques doutes sur l'emploi des transformateurs compoundés.

(1) *Bulletin de la Société Française des Electriciens*, 4e Série, Tome X, no 111 novembre 1930, p. 1191.

Je me suis déjà occupé de ces appareils, mais d'autre part nous avons construit des transformateurs non compoundés sur lesquels on obtient une précision aussi grande que l'on désire. Par exemple, l'Alsthom a construit des appareils qui ont donné à pleine charge un angle de déphasage de 10 minutes. Vous savez qu'actuellement l'Union des Syndicats admet 20 minutes à pleine charge pour les appareils du type laboratoire.

On a construit des appareils ayant un angle de déphasage de 10 et 20 minutes avec une tolérance de + ou — 5 minutes simplement en utilisant des tôles, et un nombre d'ampère-tours convenables, et en traitant les tôles après découpage pour supprimer l'écrouissage.

Dans ces conditions, on a pu construire des appareils de très grande précision, sans recourir au compoundage. C'est uniquement le prix de revient qui guide le choix entre le compoundage et une autre solution.

D'ailleurs M. Iliovici reconnaît que l'on est arrivé à construire des appareils très bons, sans compoundage, à condition d'y mettre le prix.

L'appareil dont le dessin est donné par M. Iliovici et qui est un transformateur compoundé normal, a ses enroulements primaire et secondaire sur la branche centrale, et un enroulement supplémentaire sur les branches extrêmes pour améliorer la perméabilité, ce qui permet de faire fonctionner l'appareil dans les meilleures conditions.

Or c'est une solution chère et de plus pour que le transformateur réponde réellement aux qualités indiquées, il faut avoir une source auxiliaire.

Dans son exposé M. Iliovici présente également un autre dispositif un peu plus compliqué que le premier. En plus des enroulements normaux sur la branche du milieu, il y a des enroulements supplémentaires sur les branches extrêmes et une partie magnétique double ce qui est un grand inconvénient, car si on veut que les spires supplémentaires soient réellement efficaces, il ne faut pas que le courant dans ces spires varie avec le courant principal. Or M. Iliovici a indiqué que pour que le système du compoundage soit réellement efficace, il faut un très grand nombre d'ampère-tours dans le circuit principal qui se trouve sur la branche du milieu.

Dans ces conditions, ces appareils compoundés ne sont pas commercialement très intéressants. La nécessité d'une source auxiliaire basse tension (de 10 à 12 V environ) est un grand inconvénient, parce que dans les cabines des clients, on n'a pas souvent de tension

aussi basse. On est donc obligé d'ajouter des petits transformateurs sur le secondaire du transformateur de potentiel. Mais alors, ou on abaisse la précision, ou il faut lui donner un puissance beaucoup plus grande pour alimenter ces petits transformateurs.

C'est donc un grand inconvénient de construire des appareils avec une tôle.

De plus, si le transformateur supplémentaire claque, le système ne vaut plus rien parce que le transformateur d'intensité est très mauvais, si l'on n'a pas une source auxiliaire pour alimenter l'enroulement de compoundage.

Je crois toutefois que cet appareil est sinon à peu près disparu, du moins rarement construit.

Par contre, un autre appareil que M. Iliovici nous présente, est plus intéressant au point de vue prix, parce que l'enroulement de compoundage est mis en série avec le secondaire de l'enroulement principal. Dans ces conditions, la source auxiliaire disparaît, ce qui est un avantage pour le prix, mais un grand désavantage pour la précision, parce qu'en même temps que varie le courant principal du transformateur, le courant dans l'enroulement auxiliaire varie également et le nombre d'ampère-tours de compoundage n'est pas constant, ainsi que la perméabilité de la partie magnétique. Cette solution est donc moins bonne. Le cas de l'appareil américain de la G. E. C° que je construis me semble plus intéressant, parce que c'est un appareil assez simple, M. Iliovici peut-être n'a pas vu le brevet et c'est pour cela qu'il n'a pas bien saisi pourquoi cet appareil présente des avantages réels par rapport aux autres appareils compoundés qui ont été construits jusqu'à présent.

Dans cet appareil, on ajoute des spires en série avec l'enroulement secondaire et on s'arrange de façon à avoir une perméabilité différente dans les tôles embrassées par les ampère-tours principaux et dans les tôles embrassées par les ampère-tours auxiliaires.

On travaille sur la partie inférieure de la courbe de perméabilité pour une partie de l'enroulement et sur la partie supérieure pour l'autre.

L'avantage dans ce cas est qu'au fur et à mesure que le courant augmente, la moyenne de perméabilité reste constante et on peut arriver, en choisissant bien l'emplacement des ampère-tours auxiliaires et leur nombre, à travailler toujours à perméabilité constante, c'est-à-dire à obtenir les mêmes résultats qu'avec un appareil comportant une source auxiliaire.

Dans le même appareil, en dehors des ampère-tours en série avec

l'enroulement secondaire, on améliore l'angle de déphasage par des spires en court-circuit.

Dans la partie magnétique sont pratiqués des trous. Dans une partie de ces trous sont placées les spires en série avec l'enroulement secondaire principal et dans les autres les spires en court-circuit.

M. Iliovici vous a signalé aussi dans son article un transformateur avec enroulement primaire bobiné à travers deux cylindres et qui comporte 2 parties magnétiques avec un enroulement secondaire sur chaque partie magnétique.

L'*Alsthom* construit des transformateurs analogues avec trois circuits. Cet appareil est intéressant pour la raison suivante.

Actuellement dans de grandes installations et pour les hautes tensions, on a besoin de transformateurs d'intensité, non seulement pour le comptage, mais également pour assurer une protection à maxima, en alimentant des appareils qui demandent une assez forte puissance, mais pour lesquels l'angle de déphasage peut être plus grand que pour le comptage ; de plus, on ajoute souvent une protection différentielle.

Quand on construit un transformateur d'intensité à trois enroulements secondaires, on étudie un enroulement pour le comptage, le second pour l'alimentation des relais à maxima et le troisième pour la protection différentielle.

Je crois que c'est intéressant à signaler, quand on parle des tendances actuelles des transformateurs de mesure et de l'emploi de ces derniers pour la protection différentielle.

Ordinairement, pour protéger un transformateur de puissance à très haute tension, sans employer un appareil trop cher, on se contente d'utiliser un transformateur de traversée, c'est-à-dire un anneau de tôle portant un enroulement et monté souvent sur la borne d'un interrupteur à huile. Comme le courant est assez faible du côté haute tension du transformateur de puissance, il est intéressant, pour faire une protection différentielle, de monter du côté basse tension un transformateur d'intensité dont les caractéristiques se rapprochent de celles du transformateur de traversée.

J'ai constaté que les Américains qui sont ordinairement très pratiques, mettent jusqu'à présent un transformateur de traversée du côté haute tension et un transformateur d'intensité de leur série normale du côté basse tension.

Pour arriver à faire marcher ensemble ces deux appareils, ils introduisent un autotransformateur de réglage. Beaucoup de maisons

en France introduisent des résistances sur le transformateur d'intensité, placé du côté basse tension du transformateur de puissance.

L'*Alsthom* étudie, pour la protection différentielle, un petit transformateur basse tension qui a les mêmes caractéristiques que le transformateur de traversée placé du côté haute tension.

J'ai réalisé un transformateur à trois enroulements secondaires de grande précision, un pour comptage, un autre, moins précis, pour les appareils de mesure, sauf les compteurs et pour les relais à maxima, et le troisième pour la protection différentielle. Cet appareil est seulement un peu plus long qu'un transformateur d'intensité à un seul secondaire et n'est par suite pas beaucoup plus coûteux. On peut construire ces appareils pour de très hautes tensions. Des appareils de ce genre ont été réalisés pour 60 000 volts, 30 000 volts et des tensions plus basses, et jusqu'à présent ils fonctionnent très bien.

Je crois qu'on peut pousser beaucoup plus loin ce genre de construction.

Un appareil qui a été signalé aussi par M. Iliovici et qui est très intéressant par sa construction, c'est le transformateur d'intensité à une porcelaine

On alimente un transformateur placé sur une porcelaine et dont le secondaire est formé par une spire dans laquelle passe un courant assez important. Cette spire est fermée en court-circuit à travers la même porcelaine. Une partie magnétique en forme de tore et portant un enroulement est placée autour de la même porcelaine. Cet appareil a un défaut ; il cumule les erreurs du transformateur placé sur la porcelaine et du tore autour de la porcelaine, ce qui est surtout mauvais quand on veut avoir des transformateurs de grande précision ; c'est-à-dire avec des angles très faibles et des rapports très exacts.

Sans ces erreurs, il me semble que c'est un appareil très intéressant et qui peut être assez peu coûteux même pour de fortes tensions.

Je crois intéressant de vous signaler une réalisation intéressante d'appareils de 250 A avec une seule spire et qui répondent parfaitement aux conditions de l'Union des Syndicats.

Ces appareils ont été construits, vérifiés, réceptionnés et ont donné complète satisfaction. Ils sont utilisés actuellement sur des câbles monophasés de 60 000 V et sont très bon marché. Ils ont été étudiés spécialement pour être montés même à l'extérieur. Ils sont brevetés par l'Alsthom.

Il est assez difficile de descendre au-dessous de 250 A et même pour cette intensité on a pu arriver à un bon résultat, uniquement par l'emploi de tôles spéciales et une surveillance rigoureuse de la fabrication pour éviter toute erreur possible.

Nous avons construit un autre appareil qui, au lieu d'avoir une seule spire, en a un nombre assez grand, avec une seule porcelaine ou un tube haute tension : dans une porcelaine ou dans un tube, on a placé une première spire en cuivre très fort et qui sert en même temps de support à plusieurs spires en cuivre de dimensions plus faibles, appropriées au courant qui les parcourt.

Dans ces conditions, l'appareil revient à un prix très inférieur parce que dans les appareils à haute tension, ce n'est pas le cuivre à 12, 14 ou 15 fr le kilo, qui revient cher, c'est surtout la borne haute tension, qui coûte souvent 3 000, 6 000, 10 000 fr et plus, et le gain d'une borne sur deux, réduit fortement leur prix.

Ainsi, au lieu d'avoir un système de deux transformateurs d'intensité placés l'un sur l'autre autour de la porcelaine et dont il faut compenser les erreurs, on a un transformateur ordinaire, qui comporte également une porcelaine, mais dont la construction est plus simple et qui est très intéressant pour de fortes tensions et pour de faibles intensités.

En dernier lieu, M. Iliovici a signalé un transformateur de tension en cascade ; il me semble que le reproche que l'on peut faire à cet appareil à division de tension, est surtout le nombre d'appareils introduits.

Pour arriver à obtenir une précision suffisante, on sera obligé, quand le transformateur arrivera en plate-forme, de le régler peu à peu en y ajoutant ou en enlevant des spires ou des selfs.

De plus, quand on examine deux appareils construits dans le même atelier, et suivant la même spécification, on ne peut pas dire qu'ils soient absolument identiques ; c'est d'ailleurs pour cela qu'on a accepté les tolérances sur la précision avec les signes + ou —.

Avec cet appareil composé de plusieurs transformateurs, si l'un de ces transformateurs est détérioré, on court le risque qu'après son remplacement l'ensemble ne donne plus de bons résultats, surtout quand la garantie de précision est de ± 0,5 pour cent.

Certainement c'est la pratique qui indiquera si ce système est avantageux. Mais ce qui est surtout intéressant dans la tendance actuelle des transformateurs de mesure et en particulier des transfor-

mateurs d'intensité, ce n'est pas la question de compoundage ou de la réduction des porcelaines qui est plutôt une question de prix.

Jusqu'à présent M. Iliovici s'est arrêté surtout à la façon de faire un bon appareil, mais on peut faire un très bon appareil, je le répète, sans introduire d'artifices, et sans trop augmenter le prix.

Mais ce que M. Iliovici n'a pas dit, et ce qui est je crois très intéressant dans la technique actuelle, ce sont les choses nouvelles qu'on ne demandait pas il y a un ou deux ans.

Encore actuellement, beaucoup d'exploitants ne font pas attention à deux choses ; d'abord les appareils doivent supporter de très forts court-circuits, surtout avec les grands réseaux interconnectés et il ne faut pas cependant qu'ils ne soient pas trop grands, qu'ils contiennent trop de cuivre.

Le second point est l'ouverture du circuit secondaire des transformateurs d'intensité.

Dans la conférence internationale de Berlin d'ailleurs, on a accepté que les transformateurs d'intensité soient essayés à circuit secondaire ouvert.

Dans la réunion de l'Union des Syndicats, presque tout le monde a été d'accord pour protester contre la décision de la conférence internationale, mais nous avons été quelques-uns pour démontrer l'importance de cet essai à circuit secondaire ouvert et notre délégué a reçu des directives dans ce sens.

En effet, voilà ce qui se passe dans le cas de l'ouverture du circuit secondaire d'un transformateur d'intensité.

Quand le circuit secondaire est ouvert, si l'appareil n'est pas construit spécialement pour tenir, même dans ce cas, la tension qui apparaît au secondaire et qui est surtout importante dans les appareils de grande précision, provoque le claquage de cet enroulement.

En même temps l'induction augmente beaucoup, la partie magnétique chauffe, ce qui peut également provoquer la destruction de l'appareil

Je ne peux pas dire comment nous réalisons des appareils qui peuvent tenir les essais à circuit secondaire ouvert, parce que chaque usine a ses secrets de fabrication qu'elle ne tient pas à dévoiler, surtout dans une réunion de constructeurs électriciens qui protestent contre une règle acceptée par une réunion internationale, parce qu'ils croient que la réalisation en est extraordinaire.

M. Iliovici. — Je vais répondre, d'une façon succincte, aux princi-

pales observations de M. ROSENFELD ; je m'abstiendrai d'ailleurs de toute critique concernant les appareils dont il fait l'éloge.

Transformateurs compoundés. — M. ROSENFELD affirme que les transformateurs compoundés donnent une solution chère pour l'amélioration des transformateurs de courant. Or, voilà des chiffres : le prix de tarif d'un transformateur compoundé est d'environ 25 pour 100 supérieur à celui du même transformateur sans compoundage [Cette augmentation de prix peut atteindre 50 pour 100 pour les tranformateurs de basse tension ; par contre, pour les transformateurs de haute tension, les plus intéressants à compounder, l'augmentation de prix peut devenir inférieure à 2 pour 100]. A cette légère augmentation de prix, correspondent des qualités techniques remarquables. — Ainsi le compoundage permet de faire fournir au même transformateur une puissance de précision *3 à 4 fois plus grande* que pour le même transformateur non compoundé. En d'autres termes, un seul transformateur compoundé remplace 3 à 4 transformateurs identiques, mais non compoundés, ou un seul transformateur dont la puissance de précision est 3 à 4 fois plus grande, appareil dont le prix et l'encombrement sont de beaucoup supérieurs.

De plus, le transformateur compoundé a *la propriété qu'on ne retrouve dans aucun autre modèle*, c'est que son erreur est la même pour tous les courants. Ainsi, un transformateur compoundé ayant la précision de la classe A (publication 92 de l'Union des Syndicats de l'Electricité) donnera, par exemple pour $\cos \varphi = 0,5$, une erreur inférieure à 1 pour 100 *quel que soit le courant secondaire ;* tandis qu'un transformateur de même classe, non compoundé, donnera une erreur inférieure à 1 pour 100 pour le courant nominal, mais cette erreur pourra atteindre 2 pour 100 au cinquième de ce courant et 3 pour 100 pour le dixième. Le transformateur compoundé est donc, en fait, *beaucoup plus précis.*

Une autre qualité très intéressante du transformateur compoundé est que, pour la même puissance de précision, *il sera beaucoup moins sensible aux effets des courts-circuits.* En effet, avec un même circuit magnétique, pour obtenir un transformateur de même puissance de précision, on est amené à mettre beaucoup moins d'ampère-tours pour un transformateur compoundé que lorsqu'il ne l'est pas ; on peut, en conséquence, utiliser un fil de plus forte section.

Le nombre d'ampère-tours étant plus faible, *le transformateur compoundé supporte plus facilement les effets dynamiques des courts-cir-*

cuits ; d'autre part, la section du fil étant plus forte, le transformateur compoundé chauffe moins et *supporte beaucoup mieux les effets thermiques des courts-circuits.*

Pour ce qui concerne la nécessité de l'emploi d'une source auxiliaire, remarquons que le circuit de compoundage consomme à peine 2 à 3 VA, c'est-à-dire moins que certains appareils de mesure ; son courant pourra donc être fourni facilement par un transformateur de mesure de tension, dont on dispose pratiquement toujours Comme la puissance de précision des transformateurs de tension est habituellement de beaucoup supérieure à celle dont on a besoin, le léger supplément demandé par les circuits de compoundage des transformateurs de courant n'influera pas sur la précision des transformateurs de tension.

En résumé, le compoundage d'un transformateur de courant donne à celui-ci des qualités techniques remarquables que l'on ne peut obtenir avec aucun autre dispositif ; au point de vue commercial, pour la même utilisation, les prix des transformateurs compoundés sont de beaucoup inférieurs à ceux des appareils non compoundés, surtout si on tient compte de l'encombrement des deux modèles. — La consommation du circuit de compoundage est minime et elle peut être obtenue très facilement.

Comme nous l'avons indiqué dans notre rapport, on construit deux types de transformateurs compoundés, celui de la figure 3 du rapport est de beaucoup le plus répandu. La Compagnie pour la Fabrication des Compteurs en construit *un très grand nombre*, d'une façon tout à fait industrielle.

Le compoundage de la figure 2 de notre rapport n'est employé que pour les transformateurs spéciaux ; il est accompagné d'un transformateur auxiliaire ; mais celui-ci est d'un prix faible et peu encombrant ; il est analogue à un petit transformateur de sonnerie et sa consommation est d'environ 3 à 4 VA. Comme on l'a fait remarquer plus haut, cette faible consommation ne gêne nullement les transformateurs de potentiel.

Transformateurs de tension en cascade, types CdC. — Pour répondre aux critiques de M. Rosenfeld, il suffit d'indiquer que les transformateurs auxiliaires n'ont qu'un rôle correctif et par conséquence ils n'ont pas besoin d'être réglés avec précision.

On peut facilement remplacer l'un de ces transformateurs par un autre. Il suffit qu'il soit à peu près semblable ; l'interchangeabilité est donc très facile à réaliser.

Transformateurs type Φ de la Compagnie pour la Fabrication des compteurs. — M. Rosenfeld affirme que dans cet appareil on cumule les erreurs dues aux deux transformateurs en cascade, ce qui aurait des inconvénients surtout dans les transformateurs de précision.

Les chiffres que nous avons donnés dans notre rapport (tableau page 17) contredisent nettement cette affirmation. Ils montrent que, dans ce modèle, on peut réaliser des transformateurs ayant une précision de beaucoup supérieure à celle des meilleurs transformateurs codifiés par l'Union des Syndicats de l'Electricité (classe A).

Question des règlements. — Dans mon rapport, je ne me suis effectivement pas occupé de ces questions, que je considérais comme trop nouvelles. Ne disposant que d'un nombre de pages limité, j'ai pensé que la question de la réglementation des conditions de fonctionnement des transformateurs, pourra faire l'objet d'un rapport futur.

Mais, pour donner satisfaction à M. Rosenfeld, je rappellerai que les règles françaises (Publication 92 de l'Union des Syndicats de l'Electricité) comportent des conditions de « résistance aux surintensités des transformateurs de courant » qui sont beaucoup plus sévères que dans les règles allemandes, seules règles, à notre connaissance, qui comportent de telles conditions.

Ansi, tandis que dans les règles allemandes on prévoit l'essai pendant une seconde avec un courant 50 et 75 fois le courant nominal, suivant la classe du transformateur, dans les règles françaises, on prévoit respectivement 80 et 200 fois le courant nominal.

De plus, on prévoit un essai pendant 0,1 seconde avec un courant dans le primaire dont le premier maximum est égal à 240 fois ou à 600 fois la valeur efficace du courant nominal, suivant la classe du transformateur.

Pour ce qui concerne l'essai du transformateur de courant à circuit ouvert, je pense tranquilliser M. Rosenfeld en lui disant qu'à la réunion, à Stockholm, de la Commission Electrotechnique Internationale, on a adopté l'essai pendant une minute.

D'autre part, je ne pense pas qu'il y ait des secrets de fabrication en mécanique ou en électricité ; en particulier, il n'est pas très difficile de réaliser des appareils industriels pouvant supporter les essais à circuit ouvert pendant une minute. En tous cas, on obtient de tels transformateurs à la Compagnie pour la Fabrication des Compteurs, sans employer aucun moyen mystérieux.

M. Cellerier. — Nous considérons la question comme épuisée par les deux orateurs que nous félicitons autant l'un que l'autre.

M. Pilon n'ayant pu attendre la fin de la séance, il est donné lecture de son rapport sur les « *Appareils de mesure dans l'Industrie radiologique* » (1)

M. Cellerier lit une lettre de M. Queyvron.

M. Queyvron. — Je regrette que mon service ne me permette pas d'assister à la séance et de vous présenter les trois types d'appareils que j'ai réalisés et qui ont fait l'objet de Notes à l'Académie des Sciences du 15 avril 1929 et du 13 octobre 1930 :

N° 1. — Appareil de mesure où l'aimant est remplacé par un électro-aimant (poids 15 kg.)

N° 2. — Appareil à pivots se plaçant dans l'entrefer d'un électro-aimant de laboratoire.

N° 3. — Appareil à suspension se plaçant entre les pièces polaires d'un électro. Les essais des types 2 et 3 ont été faits sur la maquette du gros Electro aimant de l'Académie des Sciences.

Les résistances intérieures des appareils 2 et 3 sont faibles (40 et 20 ohms). Pour l'appareil 1 j'ai pris 400 ohms pour montrer la possibilité de faire des milliampèremètres ou des millivoltmètres.

J'insiste sur ce fait que plus la résistance intérieure est élevée, plus la sensibilité est grande. C'est ainsi que si j'admets pour l'appareil 1 une résistance de 4 000 ohms, au lieu de 400, je peux mettre 10 fois plus de spires, par conséquent avoir un couple 10 fois plus fort. L'appareil permettrait d'apprécier 10^{-9} A ou 10^{-6} V ou 4.10^{-25} watt, avec le champ de 4 500 gauss réalisé dans l'appareil d'essai et qu'il est très facile de renforcer.

---

(1) *Bulletin de la Société Française des Electriciens*, n° 111, novembre 1930, p. 1188.

Mesure astronomique de la période du pendule (1).

par M. BAYLE.

Soit N la fréquence des battements d'un pendule, comptés par degré d'étoile.

Le temps par degré d'étoile est :

$$\frac{86164.09}{360} = \mathcal{T} \text{ [Secondes], de temps moyen.}$$

La durée connue de la demi-période est donc :

$$\frac{\mathcal{T}}{N} = t \text{ [Secondes], de temps moyen.}$$

Calcul préalable de la demi-période du pendule. — Je raisonne de préférence sur la demi-période, de coefficient $k = \pi$ tandis que celui de la période est 2π ; un coefficient est *un* nombre ; il est exceptionnel de le représenter par *deux* facteurs.

On peut d'avance déterminer la demi-période d'un pendule simple donné, dont les élongations sont très petites (θ_0 = une fraction de degré) à l'aide de la formule $t = \pi\sqrt{lg^{-1}}$; mais dans *l'état actuel* de la théorie des unités, pour établir cette formule *à priori*, avec le coefficient π, il ne suffirait pas d'être savant, il faudrait être demi-sorcier ; je vais le prouver.

Au contraire, je montre plus loin, à l'aide de la théorie positive des unités, que cette formule peut être inventée par un enfant, à la condition toutefois de soustraire ce dernier à l'influence abrutissante du langage scolaire. Il faut apprendre au bachelier que le poids d'une chose n'est pas la chose qui a du poids ; la chose est une masse ; il faut définitivement, dès l'école primaire cesser de parler du *poids d'un poids*.

Tant que cette réforme du langage ne sera pas accomplie ,aucun écolier ne comprendra rien à la question, sinon tardivement ; si on veut que cela dure, il suffit de ne rien changer à cette basse routine linguistique.

Les quatre grandeurs en cause. — Dans l'expérience du pendule

(1) Ce texte fait suite à la communication de M. Bayle qui a été coupée par erreur à la page 556 du Bulletin de mai 1931.

simple, idéal, il y a quatre grandeurs en cause, et quatre seulement : le temps, la longueur, la force et la masse. Tout homme a une connaissance naturelle, sensorielle, réelle et tellement complète de ces quatre grandeurs, qu'aucune explication n'y peut rien ajouter (1).

Si nos bacheliers « bafouillent » sur la masse, c'est que l'Université les égare systématiquement, par habitude.

Pour mesurer ces grandeurs, il faut nécessairement quatre unités, une de chaque nature, et chacune de dimension connue ; ces unités sont irréductibles les unes aux autres.

Les dimensions physiques arbitraires des quatre unités. — Les natures des unités étant connues, il reste à déterminer leurs dimensions. Je pose mon pied sur une règle ; je trace les extrémités ; la distance entre les traits est la dimension physique de l'unité de longueur ; l'unité arbitraire de longueur est créée, étalonnée ; c'est le [Pied].

J'exerce un effort quelconque sur un dynanomètre à flexions proportionnelles (peson) ; l'index de l'instrument étant immobile, je trace un repère ; j'ai ainsi déterminé la dimension physique de l'unité de force ; c'est le [Tractus].

Je prends un pavé de Paris ; il constitue l'unité de masse ; la dimension physique de cette unité est ainsi déterminée ; c'est le [Pavé].

La dimension de l'unité de temps, la seconde de temps moyen est déjà connue ; c'est une fraction, mais non simple, de l'unité sidérale prise comme unité de dimension naturelle.

Ces quatre unités arbitraires sont maintenant créées, étalonnées ; elles vont servir à l'écolier pour établir la formule du pendule.

Je n'insiste pas sur la détermination des multiples et sous-multiples des quatre étalons, ni sur la graduation des instruments, ni sur le

---

(1) Le problème de l'attraction mis à part, les guerriers armés de la fronde et du javelot, connaissaient la masse aussi bien que Newton ; un athlète lanceur du disque la connaît mieux, dans un certain sens, qu'un agrégé de physique. Au contraire, la connaissance de l'accélération, en qualité de grandeur physique, vu l'analyse préalable qu'elle exige, est plus difficile à acquérir que la connaissance de la masse ; aussi l'agrégé de physique, en général, parle-t-il plus doctement de l'accélération que le lanceur de disque.

Pour ces motifs il est contraire à toute logique d'introduire l'accélération dans la formule élémentaire du pendule.

Qu'un vrai savant, un philosophe désabusé, qui a tout vu, tout lu, tout compris, trouve quelque satisfaction à dire que nous ne connaissons rien et que nous ne saurons jamais rien, c'est naturel.

Mais seul un cuistre peut reprendre à son compte ces affirmations, à l'occasion

rapport du jour sidéral au jour solaire moyen ; tout cela est hors du sujet.

Mesures des quatre grandeurs. — Je remarque que les quatre grandeurs en cause sont susceptibles de mesures directes, la longueur par superposition ; le temps également : c'est une conséquence de la démonstration de l'isochronisme du pendule. La force se mesure directement au dynamomètre et la masse, directement à la balance (1).

La mesure de la durée de la demi-période, donnée par l'expérience précédente, est déjà connue ; c'est :

$$t\,[\mathrm{T}] = t\,[\text{Secondes}], \text{ de temps moyen.}$$

Je mesure la longueur du pendule ; je trouve l [Pieds].

Je mesure le poids de la masse au peson ; je trouve : f [Tractus].

Je mesure la masse à la balance ; je trouve : m [Pavés].

Etablissement de la formule du pendule simple par l'écolier. — Pour un pendule déterminé, les mesures donnent quatre nombres concrets ; pour un autre pendule, quatre autres nombres concrets :

1er Pendule : t, l, m, f,

2e Pendule : t_1, l_1, m_1, f_1,

Je veux prédéterminer t, en fonction des trois nombres l, m, f ; après quelques tâtonnements, je trouve :

$$t^2 = \mathrm{K}\,\frac{lm}{f}; \qquad t = k\sqrt{\frac{lm}{f}}.$$

$$t_1^2 = \mathrm{K}\,\frac{l_1 m_1}{f_1}; \qquad t_1 = k\sqrt{\frac{l_1 m_1}{f_1}}.$$

Je constate que le nombre k est le même pour les deux pendules ;

---

des premiers éléments des mesures scientifiques, éléments destinés à des écoliers.

Ceux-ci connaissent fort bien ce qu'est la longueur, la force, le temps ; ils connaissent tout aussi bien la masse ; mais dès le premier contact avec la mécanique on leur enseigne que la masse est un quotient, P/g, un rapport, un coefficient, etc. ; dès lors ils ne savent plus qu'ils savent.

Le cas du futur bachelier est pire encore ; il a entendu dire que la masse est un coefficient variable.

Ceux qui ne prolongent pas leurs études scientifiques restent convaincus, leur vie entière, qu'ils ne savent pas ce que c'est que la masse.

(1) Malgré que la précision n'ait pas sa place dans cette étude, j'ajoute : a la balance *dans le vide*.

La masse se mesure à la balance en vertu de ce corollaire de la loi de Newton corollaire jamais invoqué, et pourtant évident : deux quantités de matière, en un même lieu, également attirées par une troisième, la terre, sont des masses égales ; l'équivoque toujours soulevée au sujet de l'égalité des *masses* et des *quantités de matière*, n'a pas sa place ici ; les quantités égales sont les deux *masses*.

Toutefois, autant qu'un autre, je reconnais l'importance de la question subsidiaire, à savoir : le mot *masse* et le vocable *quantité de matière*, sont-ils deux expressions, l'une plus concise que l'autre, qui désignent une seule et même gran-

l'écolier instruit par un maître compétent, a ainsi trouvé expérimentalement la loi du pendule simple, par un procédé que je suppose nouveau.

Toutefois ce n'est pas encore la formule classique; mais nous en approchons.

La formule précédente est valable pour tous les pendules, en tous lieux, car les quatre unités sont des unités *absolues*; en effet, le Pied, le Pavé et le Tractus conservent leur même dimension physique en tous lieux (1).

Supposons que le coefficient trouvé par l'écolier soit $k = 13{,}728$. Il n'y a aucune raison de croire que le quotient lm/f est un carré parfait; donc le nombre k est incommensurable. Si on avait cherché la durée de l'oscillation complète, le facteur 2 eut été inclus dans ce nombre expérimental.

Retour aux dimensions physiques des unités du système métrique absolu. — La formule s'écrit, avec les unités arbitraires et personnelles précédentes :

$$t[\mathrm{T}] = k.\left[\frac{\mathrm{T}}{\mathrm{L}^{1/2}\mathrm{M}^{1/2}\mathrm{F}^{-1/2}}\right] \times \sqrt{\frac{lm[\mathrm{LM}]}{f[\mathrm{F}]}}.$$

---

deur physique? Ou bien la *masse* et la *quantité de matière* sont-elles deux grandeurs physiques différentes, mais proportionnelles, de sorte qu'implicitement, ou même explicitement (c'est une question d'unités), la mesure de l'une est aussi celle de l'autre?

Cette question est posée depuis Newton; elle n'a pas encore reçu de réponse ferme; pour ce motif, et pour ce motif seulement, beaucoup ont admis et admettent encore, que la *notion de masse* est plus obscure que la *notion de longueur*, alors que le contraire serait plus naturel, en raison de l'immatérialité de la longueur.

Répétons que la question de l'identité physique de la masse et de la matière est intéressante au plus haut point pour le philosophe, et même pour le physicien, mais en même temps, observons qu'il n'en est pas de plus oiseuse pour les ingénieurs.

La métaphysique ne fait pas partie de la mécanique rationnelle; un jour viendra où les ingénieurs conviendront universellement de la futilité, pour eux, d'une telle question, au moins en ce qui concerne leurs travaux usuels

Pourquoi prolonger ce débat? Pourquoi ne rejetteraient-ils pas dès aujourd'hui, la masse métaphysique, ou même la masse éventuelle des astro-physiciens, de leur domaine, essentiellement terrestre?

Il resterait deux notions de masse, l'une, provisoire si l'on veut, *mais fort claire*, la masse des ingénieurs; l'autre *obscure*, serait la masse des philosophes.

Les genres seraient séparés; l'ingénieur ne ferait plus de philosophie, branche des travaux de l'esprit où il n'excelle pas; le philosophe ne ferait plus de mécanique, où il ne brille guère, chaque chose serait à sa place et tout serait mieux.

(1) Je n'ajoute pas : à toutes les époques, car le Pavé est hygrométrique; il n'est pas à l'abri des injures du temps comme le bloc de platine enfermé dans l'armoire de fer du Pavillon de Breteuil.

L'invariabilité du Tractus est encore plus sujette à caution. Ces considérations, d'ailleurs, sont étrangères à la théorie des unités; je ne les indique qu'à titre de précaution contre une critique tâtillonne.

Remplaçons dans cette formule les unités arbitraires précédentes par les unités légales du populaire système métrique français : le mètre et le kilogramme absolu [1].

Pour l'unité de masse nous adopterons l'unité analytique bien connue des écoliers, le Newton :

Egalité physique : 1 [Newton] = 9,80 [bloc Fortin] [2].

Je passe sur les détails ; les quatre modules de transformation des dimensions physiques τ, λ, μ, φ sont connus ; opérons comme d'habitude ; tous calculs faits, le coefficient 13,728 devient : 3,1416. Ce nombre ressemble à π ; adoptons $k = \pi$; c'est le symbole d'un nombre expérimental.

Avec ces nouvelles unités l'écolier sait qu'on a : $f = mg$; d'où la formule classique du pendule idéal, simple, d'oscillations extrêmement petites :

$$t = \pi\sqrt{\frac{lm}{f} = \frac{l}{g}}.$$

Cette formule n'est pas plus compliquée que $e = \frac{1}{2}jt^2$ ou $fl = \frac{1}{2}mv^2$; sa démonstration serait sans doute enseignée à l'école primaire si on avait pu, autrefois, l'établir aussi simplement que je viens de le faire [3].

Homogénéité de la formule expérimentale. — La formule précédente est homogène, au sens spécial de ce mot, parce que, en vertu de la théorie positive des unités, on a :

$$\frac{t[\mathrm{T}]}{1[\mathrm{T}]} = k.l^{1/2}m^{1/2}f^{-1/2}$$

Le produit $k.l^{1/2}m^{1/2}f^{-1/2}$ est un nombre abstrait, indépendant des trois unités de longueur, de masse et de force, ici : le Pied, le Pavé, le Tractus ; donc :

$$t[\mathrm{T}] = (k.l^{1/2}m^{1/2}f^{-1/2})[\mathrm{T}]$$

---

(1) D'après la loi du 2 avril 1919, le kilogramme *absolu* est légal en France.

(2) Bloc de platine iridié des Archives de France, façonné par Fortin.

(3) Un agrégé de mathématiques dont je sollicitais la collaboration pour établir un petit manuel des unités, dégoûté de la simplicité de ma théorie, me signifia que c'était là de la science d'instituteur qui ne l'intéressait pas ! Je pense qu'il en sera comme il le croyait, mais plus tard. Le pur mathématicien connaît la masse comme un coefficient numérique constant, un vulgaire nombre, et rien de plus.

La raison est que la mécanique rationnelle étudie le cas des longueurs, des temps, des accélérations, etc..., variables, et seulement le cas des masses invariables, dont les mesures peuvent être traitées, et sont effectivement traitées, par une longue habitude, comme des coefficients.

Les deux membres sont deux nombres concrets égaux, accompagnés de l'unité de temps ; la relation est homogène.

Enfin l'égalité fournie par l'expérience est elle-même indépendante de l'unité de temps. Cela revient à dire que la mesure de la période du pendule, grandeur physique, peut être exprimée par un nombre quelconque, qui ne dépend que de la seule unité de temps ; ce qui est évident.

Mais si la conclusion est évidente, le raisonnement qui la provoque ne l'est pas moins.

Je pose aux membres de la Société des Electriciens, cette question : pourquoi accepter la conclusion et rejeter les prémisses ; pour quelles raisons ?

Ce que prouve l'étude mathématique du pendule. — Contrairement à ce qu'on écrit couramment, la théorie du pendule ne prouve pas que le pendule simple, idéal, est isochrone ; c'est l'expérience de Galilée, interprétée comme je viens de le faire, qui fait cette preuve. La théorie montre seulement que le nombre expérimental t, n'est égal au produit $\pi l^{1/2} g^{-1/2}$ que pour de très petites élongations, ne dépassant pas une fraction de degré, et que ce produit doit être corrigé pour des élongations plus grandes ; elle confirme que des oscillations d'égales élongations se font dans des temps égaux et qu'ainsi le pendule est une machine à diviser le temps

Elle montre surtout que le coefficient k est incommensurable et que, si on pouvait déterminer avec sécurité, la 10e ou la 20e décimale du coefficient expérimental de la formule $t = k\sqrt{\frac{lm}{f}}$, on trouverait justement celles du nombre π.

Ceci à condition, toutefois, que les quatre unités qui interviennent aient certaines dimensions physiques, d'ailleurs quelconques, mais satisfaisant cependant à la relation des modules : $\tau : \lambda^{1/2} \mu^{1/2} \varphi^{-1/2} = 1$. Ces modules sont rapportés aux unités de longueur, de force, de masse et de temps : le Mètre, le Kilogramme absolu, le Newton (9,80 fortins) et la Seconde de temps moyen.

La théorie positive des unités a éclairci pour moi une question autrefois apprise, mais mal comprise ; il se pourrait qu'elle rende le même service à autrui.

La formule du pendule idéal simple dont les élongations sont petites, sans être extrêmement petites (élongations de 2 à 3°). — Je dédie ce qui suit au physicien qui le premier a dit que l'angle était une grandeur sans

dimension et à ceux qui l'ont cru ; nous sommes ici au cœur de la nouvelle conception des unités physiques.

La formule complète du pendule, sans amortissement, pour une élongation quelconque, est :

$$t = \pi\sqrt{\frac{l}{g}} \times f(\sin\theta_0)$$

La fonction $f(\sin\theta_0)$ est un nombre; beaucoup l'affirment; je l'ai prouvé sur le développement du sinus (1) ; c'est mieux. La formule approchée, connue, est :

$$t = \pi\sqrt{\frac{l}{g}} \times \left(1 + \frac{\theta_0^2}{16}\right).$$

Ici aux quatre unités précédentes [L], [M], [T], [F], se joint l'unité d'angle [A]; on a la formule métriquement homogène suivante :

$$t[T] = k\left[\frac{T}{L^{1/2}M^{1/2}F^{-1/2}}\right] \times \sqrt{\frac{lm[LM]}{f[F]}} + k'\left[\frac{T}{A^2L^{1/2}M^{1/2}F^{-1/2}}\right] \times \theta_0^2[A^2].$$

Avec des unités arbitraires quelconquess, y compris l'unité d'angle, les coefficients k et k' sont numériquementquelconques. Avec les unités usuelles : le mètre, le kilogramme absolu, le Newton et le radian et la seconde de temps moyen, on a :

$$k = \pi; \qquad k' = \frac{\pi}{16} = \text{un nombre.}$$

En changeant la dimension de l'unité d'angle, en remplaçant le radian par le degré sexagésimal, on a :

$$k = \pi; \qquad k' = \frac{\pi}{52\,222} = \text{un autre nombre.}$$

La valeur numérique du coefficient k dépend des dimensions physiques des quatre unités [L], [M], [F], [T]; celle du coefficient k' dépend des dimensions de ces quatre unités et, en plus, de celle de l'unité de l'angle [A].

Conclusions. — On voit ainsi que l'étude du pendule donne lieu à une application intéressante de la théorie positive des unités; cette application conduit à une démonstration de la loi du pendule assez simple pour trouver place dans tous les manuels élémentaires, alors qu'elle ne figure nulle part. Cette application est valable pour toutes les trans-

(1) J'ai consacré une dizaine de pages du livre *Les Hauts Salaires* (Alcan, éditeur, à l'étude du sinus et des unités angulaires.

formations de la formule du mouvement pendulaire ; soit pour le cas d'une masse attirée par un centre proportionnellement à la distance :

$$t = \pi\sqrt{\frac{1}{j'} = \frac{r}{rj'} = \frac{r}{j} = \frac{mr}{mj} = \frac{mr}{f} = \frac{m}{f:r} = \frac{m}{\alpha} = \frac{mr^2}{fr} = \cdots\cdots}$$

Pour le pendule proprement dit :

$$t = \pi\sqrt{\frac{1}{j'} = \frac{r}{j} = \frac{l}{g} = \frac{ml}{mg} = \frac{ml}{p=f} = \frac{m}{p:l} = \frac{m}{\alpha} = \frac{ml^2}{pl} = \frac{1}{C} = \cdots}$$

Le nombre j' est la mesure de l'accélération à l'unité de distance du centre d'attraction.

Je réitère mon appel aux membres de la *Société des Electriciens* pour m'aider à faire prévaloir la théorie positive des équations de dimensions ; il sera possible ensuite, mais ensuite seulement, d'être plus bref.

Une enquête nécessaire. — Il serait intéressant de connaître l'opinion actuelle des Ingénieurs électriciens sur le point crucial de la nouvelle théorie des unités ; aussi je demande officiellement à la *Société* d'ouvrir, auprès de ses membres, une enquête sur la masse, en leur posant la question suivante :

Concevez-vous la masse comme un coefficient ou comme une grandeur physique (1).

Réponse : { C'est un coefficient, un nombre.
C'est une grandeur matérielle.

Biffer l'une des deux réponses ; dater, signer et retourner à la *Société*.

Cette enquête peut être conduite à bonne fin à l'aide d'un simple papillon introduit dans le Bulletin de la Société qui publiera cette note, au cours de laquelle je ne me suis pas éloigné de mon sujet : *les unités physiques*.

---

(1) Puisque je demande une enquête sur la masse..... précisons : celle des ingénieurs..... nul ne me saura mauvais gré de m'expliquer complètement.

Depuis que j'ai acquis la certitude tardive, il y a une vingtaine d'années, que je connaissais *clairement* la masse (un meilleur enseignement eut pu me communiquer cette certitude vingt-cinq ans plus tôt), j'ai eu souvent l'occasion de le dire et, tout aussi souvent, à mon grand étonnement, j'ai eu aussi l'occasion de m'entendre répondre, avec plus ou moins de forme, que j'étais un prétentieux ignorant, qui affirmait connaître l'inconnaissable ; depuis la vulgarisation (?) de la théorie de la relativité, ces délicates aménités, à peine voilées, étaient accompagnées d'un sentiment de pitié pour ma personne.

Aussi est-ce là une expérience personnelle qu'aucune affirmation contraire ne saurait affaiblir ; de sorte que, même si tous les ingénieurs électriciens répondaient que m, la masse, n'est pas un coefficient, un nombre, mais le résultat numérique de la mesure directe, à la balance, de la grandeur la mieux connue, beaucoup mieux connue que la longueur, *grandeur immatérielle* il n'en résulterait cependant pas que cette opinion professionnelle commune aux ingénieurs soit celle de tout le monde.

Rien ne me serait plus facile que de trouver dans la littérature technique, même

Enquête sur la masse. — Pour que l'enquête sur la masse ne contribue pas, contrairement à son objet, à obscurcir davantage un sujet déjà obscur, quelques mots sont nécessaires. D'après la théorie positive des unités, un coefficient, en physique comme en mathématiques, est un nombre de proportionnalité, un nombre pur, un nombre abstrait.

D'après l'ancienne théorie des unités, la définition du mot coefficient s'il en est une généralement acceptée, est moins précise ; de sorte qu'il se pourrait que l'enquête sur la masse dégénérât en une autre enquête, d'ordre grammatical, sur le sens accordé par les physiciens au mot coefficient.

Je me hâte de dire que l'une et l'autre de ces deux enquêtes seraient d'une grande utilité pour les Ingénieurs électriciens, mais à la condition expresse qu'elles ne se confondissent point, qu'elles ne soient pas simultanées, mais successives dans l'esprit de chacun.

Peut-être même l'enquête grammaticale est-elle la plus urgente, car le moyen, très connu, de « philosopher » sans fin ni conclusion, c'est d'user de mots dont le sens est indéterminé.

C'est ainsi que dans la théorie du pendule idéal, d'après la définition précédente, aucun doute n'est possible; parmi les cinq nombres, t, k, l, m, f quatre sont concrets, t, l, m, f, et un seul, k, est abstrait : ce dernier est le coefficient numérique de proportionnalité.

J'ai effleuré la question des coefficients, d'ailleurs délicate, dans le livre *Les hauts salaires*, p. 221 et aussi dans le *Bulletin de la Société des Ingénieurs E.S.E.* de février 1926, à l'occasion de la grandeur géométrique, dite surface.

Je me limite ici à cette observation : dans l'étude d'un pendule donné, les quatre nombres, t, l, m, f, sont constants, mais d'après la nouvelle théorie des unités, aucun d'eux n'est un coefficient, malgré leur invariabilité; de même dans l'expression $l = 1/2\, jt^2$, $k = 0{,}5$ est le coefficient de proportionnalité, mais contrairement à ce que, en effet,

---

récente, des dissertations sur la masse, coefficient d'inertie, constant pour les uns, variable pour les autres ; à supposer que l'existence de cette masse soit assurée, ce n'est pas celle des ingénienrs.

Par contre si on voulait admettre que l'opinion commune des électriciens, que je cherche particulièrement à toucher ici, est celle même que je défends, il en résulterait que la théorie positive des unités serait valable pour la longueur, la force, le temps et la masse : dès lors il serait possible de la pousser un peu plus loin, alors que ce travail est inutile encore aujourd'hui.

Tous les ingénieurs doivent connaitre et reconnaitre, qu'ils *connaissent* la masse ; mieux que le temps ; cette note même, comme aussi la résistance que j'éprouve de la part de certains ingénieurs mécaniciens, à obtenir la réhabilitation du Système Métrique, en qualité de système *scientifique*, montrent qu'il n'en est pas encore ainsi, unanimement.

Quelques hirondelles ne font pas le printemps !

on écrit souvent, le nombre j ou g n'est pas un coefficient, mais un nombre concret, mesure d'une grandeur. Toutefois il est des cas moins évidents : l'enquête grammaticale, si elle a lieu, ne sera pas inutile. Exemple : si m et g peuvent être raisonnablement dénommés des coefficients, la relation de Galilée $f = k\ mg$, a son second membre composé de trois coefficients ; n'est-ce pas excessif ? La langue est-elle bien faite ? Si une mesure peut être un coefficient, la règle est-elle générale et applicable à la longueur, et à la vitesse, etc ? Si m est alternativement une mesure ou un coefficient, quand m est une mesure, où est le coefficient, et quand m est un coefficient, où est la mesure ?

INFORMATIONS
DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRICIENS

13e Congrès Tchécoslovaque des ingénieurs électriciens

Le 13e Congrès Tchécoslovaque des Ingénieurs Electriciens s'est tenu à Karlovy Vary (Carlsbad) du 1er au 5 mai 1931. Il a réuni environ 500 participants venus de toute la Tchécoslovaquie.

Au cours de la séance solennelle d'ouverture tenue dans la grande salle de l'Elite-bio, le président Besinsky a rappelé brièvement les résultats obtenus pendant l'année écoulée; la lecture de la liste des membres décédés a été écoutée debout. Tous les organismes et ministères d'Etat ainsi que les associations étrangères étaient, ou excusées, ou représentées. La lecture du télégramme de la Société Française des Electriciens, ainsi que la cordiale allocution de M. Cacheux, notre délégué, apportant l'expression de notre sympathie, ont été très vivement applaudies. Le travail s'est ensuite poursuivi dans les différentes commissions.

Un programme spécial a été prévu pour les dames.

Le lundi, les congressistes visitaient la fabrique Merklein de porcelaines électrotechniques : à côté d'une visite détaillée de la fabrication, il était donné aux congressistes d'assister à des essais divers d'isolateurs dans le grand laboratoire de Merklein, disposant de 1 000 000 V par 3 transformateurs de 350 000 V et de visiter un centre radioactif. Le 5 mai, visite très intéressante des usines Mannessman.

L'année écoulée a vu la fusion de Elektrotechnicky Svaz (ingénieurs tchèques) et du Deutsche Versammlung. Ainsi le Elektrotechnicky Svaz Ceskoslovensky groupe désormais tous les ingénieurs électriciens.

A la séance de clôture, M. Ambros, de Bratislava, a été nommé président pour l'année à venir et le futur congrès se tiendra en 1932 à Urhorod dans l'Est de la Tchécoslovaquie.

TRAVAUX DES SECTIONS

COMMUNICATIONS

OSCILLATIONS FORCÉES D'UN ALTERNATEUR OU MOTEUR SYNCHRONE POLYPHASÉ (1)

par M. F. MARCAND.

Ingénieur civil des Mines.

I. — PRÉLIMINAIRES.

Cette étude fait suite au mémoire qui a été publié dans le *Bulletin de la Société française des Electriciens* de décembre 1930. Dans ce mémoire nous avons déterminé, en partant de la théorie des deux réactions généralisées à l'état variable, les équations des petits mouvements d'une machine synchrone, autour d'un état permanent, et nous avons appliqué ces équations au cas le plus usuel d'une machine à excitation fixe, reliée à un réseau de tension donnée, et soumise à un couple moteur ou résistant, également donné.

La solution générale du système d'équations différentielles obtenu, donne les petits mouvements provoqués, soit par des variations du couple, soit par des variations de la tension du réseau en grandeur et en phase.

Elle comprend *les oscillations libres* et *les oscillations forcées.*

Laissant de côté dans notre premier article la question des oscillations forcées, nous avons développé une analyse détaillée du mouvement libre et de sa stabilité.

Nous avons montré que ce mouvement libre, dépend d'une équation du 6e degré (2) et se compose généralement : 1° d'une oscillation très

---

(1) Communication présentée à la séance du 6 mai 1931 de la 1re Section.

(2) L'étude de M. CHIPART de 1917, dont nous avons parlé dans notre premier mémoire, étant demeurée inédite, M. BLONDEL a été le premier à publier en 1923 (*Revue générale de l'électricité*, février-mars 1923) une méthode d'étude des oscillations des alternateurs accouplés, fondée sur la considération directe des petits mouvements libres et la méthode des suites de STURM étudiée successivement par ROUCH, HURWICZ, LIÉNARD et CHIPART.

Antérieurement à 1923, aucune publication de cette méthode aux alternateurs accouplés, n'avait été faite. On se contentait d'utiliser l'équation du second degré

rapide de pulsation voisine de celle du courant; 2° de deux termes apériodiques convergents, provoqués par les constantes de temps des courants d'amortissement; 3° d'une oscillation lente donnant la période propre de la machine.

Il a été établi en particulier que, contrairement aux résultats obtenus, quand on néglige certains termes des expressions de la tension et du couple, *l'inégalité des réactions* n'introduit en réalité aucun élément d'amortissement dans le mouvement de la machine, et une étude spéciale a été consacrée à l'influence de la résistanee de l'induit, défavorable à la stabilité de l'oscillation lente.

Nous nous proposons dans ce qui suit d'étendre notre étude *aux oscillations forcées*.

Nous exposons dans la première partie comment on peut, à partir de l'équation caractéristique obtenue dans l'étude précédente, calculer les amplitudes des oscillations forcées, produites par des variations pendulaires *du couple appliqué* seul, abstraction faite de toute variation de la tension.

Dans le cas de très lentes variations du couple, les courants d'amortissement de la machine n'ont pas d'influence sensible, et le calcul de l'amplitude du mouvement du rotor, ne fait alors intervenir que le *couple synchronisant* usuel égal à la dérivée par rapport au déphasage interne, de l'expression du couple en régime permanent.

Ce couple synchronisant correspond au terme constant de l'équation caractéristique des oscillations.

Lorsqu'il s'agit d'oscillations forcées de pulsation assez élevée, la solution exacte doit tenir compte de tous les termes de cette équation caractéristique. Cette solution fait alors apparaître : *a*) *un couple d'amortissement apparent*, fonction de la fréquence de l'oscillation, qui provoque un déphasage entre le mouvement du rotor et l'oscillation du couple ; *b*) *un couple synchronisant apparent*, supérieur au couple synchronisant usuel et également fonction de la pulsation du mouvement.

Nous explicitons les expressions de ces grandeurs d'abord dans le cas usuel où la résistance de l'induit de la machine est négligeable, et en donnons la représentation géométrique à l'aide de diagrammes circulaires, sous une forme analogue à celle employée par M. Blondel en 1923 (1).

---

correspondant aux oscillations forcées stationnaires alors que le mouvement libre réel dépend d'une équation caractéristique de degré supérieur.

(1) A. Blondel. — Application de la méthode des deux réactions à l'étude des

Nos résultats présentent toutefois la particularité déjà indiquée ci-dessus, de ne pas contenir de terme d'amortissement dû à l'inégalité des réactions, et M. BLONDEL à qui nous avons communiqué ce résultat nouveau, en a reconnu l'exactitude.

D'autre part, nous rapprochons l'expression du couple synchronisant apparent que nous avons obtenue, de la formule donnée par M. PUTMAN en 1926 (1) dans l'hypothèse d'une machine sans amortissement transversal.

Nous étudions ensuite l'influence de la résistance de l'induit, abstraction faite des courants d'amortissement.

Si cette résistance est inférieure à une certaine valeur limite très élevée dont nous donnons l'expression (valeur égale à la réactance de la machine quand celle-ci est constante), elle provoque pour les oscillations forcées suffisamment lentes, *un couple d'amortissement apparent négatif*.

Ce fait qui a été signalé par M. BOUCHEROT en 1913 (2) est à rapprocher de *l'instabilité de l'oscillation libre provoquée par la résistance*, démontrée directement dans notre premier mémoire.

Toutefois, en théorie, les deux questions ne se confondent pas exactement, et il peut exister des valeurs de la résistance qui donnent un amortissement apparent négatif pour les oscillations forcées, tout en laissant l'oscillation libre stable.

Si l'on envisage le cas général où l'on a à tenir compte à la fois des courants d'amortissement et de la résistance de l'induit, le calcul du couple d'amortissement conduit à une formule compliquée. Nous en donnons l'expression simplifiée pour *les oscillations lentes seulement* et dans l'hypothèse d'une machine à réactions égales.

Dans la deuxième partie de cet article, nous donnons les résultats d'une théorie analogue pour les oscillations provoquées par des variations pendulaires de la phase et de la valeur efficace de la tension aux bornes, en nous limitant au cas où la résistance est négligeable.

Les formules obtenues sont assez complexes, mais elles se simplifient quand il s'agit soit d'oscillations lentes, soit d'oscillations très rapides qui deviennent alors purement électriques.

---

phénomènes oscillations des alternateurs couplés. *Revue générale de l'électricité* 17 février, 31 mars 1923.

(1) H. V. PUTMANN. — Synchronizing Power in synchronous machines. *Journal of the American Institute of electrical engineers*. New-York, décembre 1926, pages 1229 à 1237.

(2) BOUCHEROT Amortissement et amortisseurs des alternateurs. *La Lumière Electrique*, 8-15-22 novembre 1913.

Nous terminons par quelques considérations, déduites des résultats précédents, sur l'équation générale des oscillations forcées lentes, quand il y a à la fois variations de couple et de tension, et sur l'emploi qui peut être fait de cette équation, sous certaines réserves, pour le calcul approché de l'oscillation propre de la machine, comme il est admis dans les théories élémentaires.

II. — Rappel des notations employées et des équations obtenues.

a) Données de la machine. — $K = \frac{J}{p^2}$ coefficient d'inertie (J, moment d'inertie du rotor et p, nombre de paires de pôles).

$(s + A)$ réactance directe de l'induit.

$(s + B)$ réactance transversale de l'induit.

r résistance d'une phase.

$$\operatorname{tg}^2 \alpha = \frac{r^2}{(s + A)(s + B)\omega^2}.$$

σ_1, σ_2 coefficients de dispersion des courants d'amortissement direct et transversal.

$\varepsilon_1 = \frac{r_1}{l_1}$, $\varepsilon_2 = \frac{r_2}{l_2}$; inverses des constantes de temps des courants d'amortissement.

b) Données du régime permanent considéré. — ω pulsation du réseau.

U tension efficace du réseau (u, valeur instantanée).

χ phase de la tension du réseau.

$\theta_0 = \omega t + \frac{2n\pi}{3}$ angles électriques des phases de l'induit.

E force électro-motrice à vide.

Ψ déphasage de U en arrière de E.

φ déphasage du courant débité, en arrière de U.

F_{l_0}, F_{t_0} flux direct et flux transversal.

X_0, Y_0, courant direct et courant transversal.

Ces grandeurs du régime permanent sont liées par les relations :

$$\left.\begin{aligned} F_{t_0}\omega &= U\sqrt{2}\cos\Psi + rY_0 \\ F_{l_0}\omega &= U\sqrt{2}\sin\Psi - rX_0 \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

et

$$\left.\begin{aligned} F_{l_0} &= \frac{E\sqrt{2}}{\omega} + (s + A)X_0 \\ F_{t_0} &= (s + B)Y_0 \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

c) Couple synchronisant des oscillations lentes. — La valeur de ce

couple est obtenue en prenant la dérivée par rapport au déphasage Ψ du couple en régime permanent.

$$\Gamma_0 = \frac{\partial C_0}{\partial \Psi}.$$

Elle a pour expression

$$\Gamma_0 = C_s - \frac{3}{2} \sin^2\alpha \left[P_0^2(s+B) + Q_0^2(s+A)\right]. \tag{3}$$

Les grandeurs P_0, Q_0, C_s étant définies par les formules :

$$\left.\begin{aligned} P_0 &= -X_0 + \frac{F_{l_0}}{(s+B)} \\ Q_0 &= Y_0 - \frac{F_{t_0}}{s+A} \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

$$C_s = \frac{3}{2}(P_0 F_{l_0} - Q_0 F_{t_0}) \tag{5}$$

formules qui peuvent encore s'écrire en tenant compte de (2)

$$\left.\begin{aligned} P_0 &= \frac{E\sqrt{2}}{(s+A)\omega} + F_{l_0}\left(\frac{1}{s+B} - \frac{1}{s+A}\right) \\ Q_0 &= F_{t_0}\left(\frac{1}{s+B} - \frac{1}{s+A}\right) \end{aligned}\right\} \tag{4 bis}$$

$$C_s = \frac{3}{2}\left[\frac{E\sqrt{2}.F_{l_0}}{(s+A)\omega} + (F_{l_0}^2 - F_{t_0}^2)\left(\frac{1}{s+B} - \frac{1}{s+A}\right)\right] \tag{5 bis}$$

Quand la résistance d'induit est négligeable $(r = 0)$, on a :

$$\sin\alpha = 0,$$

l'expression (3) du couple synchronisant se réduit à :

$$\Gamma_0 = C_s.$$

Les formules (1) donnent alors simplement

$$F_{l_0} = \frac{U\sqrt{2}}{\omega}\cos\Psi, \qquad F_{t_0} = \frac{U\sqrt{2}}{\omega}\sin\Psi,$$

donc les formules (5) et (5 *bis*) s'écrivent

$$C_s = 3\frac{U^2}{\omega^2}\left(\frac{\sin^2\Psi}{s+A} + \frac{\cos^2\Psi}{s+B}\right) + \frac{3UI\sin\varphi}{\omega} \tag{6}$$

$$C_s = 3\left[\frac{EU\cos\Psi}{(s+A)\omega^2} + \frac{U^2}{\omega^2}\cos 2\Psi\left(\frac{1}{s+B} - \frac{1}{s+A}\right)\right] \tag{6 bis}$$

d) Equations des petits mouvements. — Nous avons démontré dans notre première étude que les équations générales des oscillations autour d'un régime permanent, d'une machine à excitation fixe, sou-

mise à un couple et une tension aux bornes données sont (1) :

$$\left.\begin{array}{l}
\frac{2}{3}\mathrm{K}\frac{d^2\Delta\theta}{dt^2} - \mathrm{F}_{t_0}\Delta\mathrm{X} + \mathrm{F}_{l_0}\Delta\mathrm{Y} + \mathrm{Y}_0\Delta\mathrm{F}_l - \mathrm{X}_0\Delta\mathrm{F}_t = \frac{2}{3}\cdot\frac{\Delta\mathrm{C}_m}{p} \\
-(s+\mathrm{A})\left[\Delta\mathrm{X} + \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1}\frac{d}{dt}\Delta\mathrm{X}\right] + \Delta\mathrm{F}_l + \frac{1}{\varepsilon_1}\frac{d}{dt}\Delta\mathrm{F}_l = 0 \\
-(s+\mathrm{B})\left[\Delta\mathrm{Y} + \frac{\sigma_2}{\varepsilon_2}\frac{d}{dt}\Delta\mathrm{Y}\right] + \Delta\mathrm{F}_t + \frac{1}{\varepsilon_2}\frac{d}{dt}\Delta\mathrm{F}_t = 0 \\
\mathrm{F}_{t_0}\frac{d}{dt}\Delta\theta - (\omega\mathrm{F}_{l_0} - r\mathrm{Y}_0)\Delta\theta + r\Delta\mathrm{X} + \frac{d}{dt}\Delta\mathrm{F}_l + \omega\Delta\mathrm{F}_t = -\sum\frac{2}{3}\Delta u\cos\theta_0 \\
-\mathrm{F}_{l_0}\frac{d}{dt}\Delta\theta - (\omega\mathrm{F}_{t_0} + r\mathrm{X}_0\,\Delta\theta + r\Delta\mathrm{Y} - \omega\Delta\mathrm{F}_l + \frac{dt}{dt}\Delta\mathrm{F}_t = -\sum\frac{2}{3}\Delta u\sin\theta_0
\end{array}\right\} \quad (\mathrm{A})$$

ΔC_m, $\sum\frac{2}{3}\Delta u\cos\theta_0$, $\sum\frac{2}{3}\Delta u\sin\theta_0$, correspondent aux variations *données* du couple et de la tension aux bornes.

$\Delta\theta$, ΔX, ΔY, ΔF_l, ΔF_t, sont les variations des grandeurs θ, X, Y, F_l, F_t.

PREMIÈRE PARTIE

Oscillations forcées dues aux variations du couple.

Considérons des oscillations de la forme e^{zt}, c'est-à-dire posons :

$$\begin{array}{ll}
\multicolumn{2}{c}{\Delta\mathrm{C}_m = \Delta\mathrm{C}_{m_0}e^{zt},} \\
\Sigma\Delta u\cos\theta_0 = \Delta v_1 e^{zt}, & \Sigma\Delta u\sin\theta_0 = \Delta v_2\,{}^{zt} \\
\Delta\mathrm{X} = \Delta\mathrm{X}_0 e^{zt}, & \Delta\mathrm{Y} = \Delta\mathrm{Y}_0 e^{zt} \\
\Delta\mathrm{F}_l = \Delta\mathrm{F}_{l_0}e^{zt}, & \Delta\mathrm{F}_t = \Delta\mathrm{F}_{t_0}e^{zt}
\end{array} \quad (7)$$

ΔC_{m_0}, Δv_1, ΔX_0, ΔF_{l_0}..... désignant des amplitudes réelles ou complexes *constantes*.

Si l'exposant z est une imaginaire pure et a pour valeur

$$z = i\Omega,$$

ces expressions représentent en grandeurs complexes, des oscillations sinusoïdales stationnaires de pulsation Ω.

Si z est un nombre complexe, ou réel, elles peuvent représenter des oscillations amorties, ou des mouvements apériodiques.

En portant ces expressions (7) dans les équations (A) on obtient un système linéaire en $\Delta\theta$, ΔX, ΔF_l..... qui s'écrit :

---

(1) Cf. *Bulletin S. F. E.* Décembre 1930 page 1313, formules (12), (13), (15 *bis*) de la première partie.

$$\left.\begin{aligned}
&Kz^2\Delta\theta - \frac{3}{2} F_{t_0}\Delta X + \frac{3}{2} F_{l_0}\Delta Y + \frac{3}{2} Y_0\Delta F_l - \frac{3}{2} X_0\Delta F_t = \frac{1}{p}\cdot \Delta C_m \\
&-(s+A)\left(1+\frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} z\right)\Delta X + \left(1+\frac{1}{\varepsilon_1} z\right)\Delta F_l = 0 \\
&-(s+B)\left(1+\frac{\sigma_2}{\varepsilon_2} z\right)\Delta Y + \left(1+\frac{1}{\varepsilon_2} z\right)\Delta F_t = 0. \\
&(F_{t_0}z - \omega F_{l_0} + rY_0)\Delta\theta + r\Delta X + z\Delta F_l + \omega\Delta F_t = -\frac{2}{3}\Sigma\Delta u \cos\theta_0 \\
&-(F_{l_0}z + \omega F_{t_0} + rX_0)\Delta\theta + r\Delta Y - \omega\Delta F_l + z\Delta F_t = -\frac{2}{3}\Sigma\Delta u \sin\theta.
\end{aligned}\right\}\ (B)$$

Le déterminant formé par les coefficients des premiers membres de ces équations, est :

$$(8)\ \mathcal{D}(z) = \begin{vmatrix}
Kz^2 & -\frac{3}{2}F_{t_0} & \frac{3}{2}F_{l_0} & \frac{3}{2}Y_0 & -\frac{3}{2}X_0 \\
0 & -(s+A)\left(1+\frac{1}{\varepsilon_1}z\right) & 0 & \left(1+\frac{1}{\varepsilon_1}z\right) & 0 \\
0 & 0 & -(s+B)\left(1+\frac{\sigma_2}{\varepsilon_2}z\right) & 0 & \left(1+\frac{1}{\varepsilon_2}z\right) \\
(F_{t_0}z - \omega F_{l_0} + rY_0) & r & 0 & z & \omega \\
-(F_{l_0}z + \omega F_{t_0} + rX_0) & 0 & r & -\omega & z
\end{vmatrix}$$

On sait que la recherche *de l'oscillation libre* de la machine revient à écrire que les équations linéaires (B) supposées sans seconds membres sont compatibles, ce qui donne *l'équation caractéristique*.

$$\mathcal{D}(z) = 0,$$

qui définit les valeurs — réelles et complexes — de z correspondant aux termes du mouvement libre, et que nous avons étudiée dans le mémoire précité.

Quand il s'agit *d'oscillations forcées*, z étant donné, ainsi que les seconds membres ΔCm, $\Sigma\Delta u\cos\theta$, $\Sigma\Delta u\sin\theta_0$ la résolution du système (B) donne les amplitudes $\Delta\theta$, ΔX, ΔY, ΔF_l, ΔF_t, des oscillations des grandeurs θ, X, Y, F_l, F_t.

Nous ne nous occuperons dans ce chapitre que des oscillations dues aux variations de couple ΔC_m. Les termes $\Sigma\Delta u\cos\theta_0$, $\Sigma\Delta u\sin\theta_0$, qui correspondent à des variations de tension aux bornes seront donc supposés nuls.

Dans ces conditions, la solution du système (B) est donnée d'après la règle de Cramer, par :

$$\frac{1}{p}\cdot\frac{\Delta C_m}{\mathcal{D}(z)} = \frac{\Delta\theta}{\mathcal{M}(z)} = \frac{-\Delta X}{\mathcal{M}'(z)} = \frac{\Delta Y}{\mathcal{M}''(z)} = \ldots\ldots \qquad (9)$$

$\mathfrak{M}(z)$, $\mathfrak{M}'(z)$, $\mathfrak{M}''(z)$ ...... représentant les mineurs des termes successifs de la première ligne du déterminant caractéristique $\mathcal{D}(z)$ écrit ci-dessus.

Attachons-nous à étudier spécialement la première relation :

$$\frac{1}{p} \Delta C_m = \Delta\theta . \frac{\mathcal{D}(z)}{\mathfrak{M}(z)}, \qquad (9\ bis)$$

qui donne l'amplitude de l'oscillation du rotor $\Delta\theta$.

Le mineur $\mathfrak{M}(z)$ du premier terme Kz^2 de $\mathcal{D}(z)$ sera du quatrième degré en (z) et pourra s'écrire :

$$\mathfrak{M}(z) = 1 + n_1 z + n_2 z^2 + n_3 z^3 + n_4 z^4. \qquad (10)$$

Nous admettons que le terme constant de ce développement a été ramené à l'unité en multipliant $\mathcal{D}(z)$ par un facteur constant approprié, ce qui ne change pas le rapport $\frac{\mathcal{D}(z)}{\mathfrak{M}(z)}$.

Les autres coefficients de ce mineur : n_1, n_2, n_3, n_4 sont tous positifs, comme on le verrait aisément en les explicitant.

Le développement de $\mathcal{D}(z)$ donnera :

$$\mathcal{D}(z) = Kz^2 . \mathfrak{M}(z) + a + a_1 z + a_2 z^2 + a_3 z^3 + a_4 z^4 + a_5 z^5. \qquad (11)$$

Le polynôme qui suit $\mathfrak{M}(z)$ sera du cinquième degré. Le coefficient a qui représente le terme constant de $\mathcal{D}(z)$ a pour expression comme nous l'avons montré dans notre première étude

$$a = C_s - \frac{3}{2} \sin^2 \alpha \left[P_0^2(s + B) + Q_0^2(s + A)\right].$$

Cette valeur qui est indépendante des coefficients σ_1, σ_2, ε_1, ε_2, des courants d'amortissement est égale *au couple synchronisant* Γ_0 *défini précédemment* (formule 3).

La condition $a = \Gamma_0 > 0$ est, ainsi que nous l'avons démontré, nécessaire pour la stabilité de l'oscillation libre et généralement suffisante si la résistance d'induit n'est pas trop élevée.

En remplaçant dans (9 *bis*) $\mathcal{D}(z)$ et $\mathfrak{M}(z)$ par les développements (10) et (11) il viendra

$$\frac{1}{p} \Delta C_m = \Delta\theta \left[Kz^2 + \frac{\Gamma_0 + a_1 z + a_2 z^2 + a_3 z^3 + a_4 z^4 + a_5 z^5}{1 + n_1 z + n_2 z^2 + n_3 z^3 + n_4 z^4} \right], \qquad (12)$$

Cette formule est valable pour des valeurs de z aussi bien réelles qu'imaginaires ou complexes, et peut par conséquent s'appliquer à des petits mouvements soit apériodiques, soit sinusoïdaux stationnaires, soit sinusoïdaux amortis

Limitons-nous au cas *des oscillations stationnaires* de la forme :

$$\Delta C_m = \Delta C_{m_0} \cos \Omega t,$$

c'est-à-dire en grandeurs complexes :

$$\Delta C_m = \Delta C_{m_0} e^{i\Omega t}.$$

Il suffira de poser dans les formules précédentes : $z = i\Omega$.

En faisant cette substitution dans (12) l'expression qui suit le terme Kz^2 prendra la forme complexe. On l'écrira

$$\frac{\Gamma_0 - \Omega^2(a_2 - a_4\Omega^2) + i\Omega(a_1 - a_3\Omega^2 + a_5\Omega^4)}{(1 - n_2\Omega^2 + n_4\Omega^4) + i\Omega(n_1 - n_3\Omega^2)} = \Gamma + \mu\Omega i. \quad (13)$$

Γ désignant la partie réelle qui pour Ω très petit, tend vers la valeur Γ_0, et $\mu\Omega$ désignant la partie imaginaire qui contient Ω en facteur, et dont le coefficient μ tend pour Ω très petit vers la valeur :

$$\mu_0 = a_1 - n_1.$$

Et on aura avec ces notations :

$$\frac{1}{p}\,\Delta C_m = \Delta\theta\left[- K\Omega^2 + \Gamma + \mu\Omega i\right] \quad (14)$$

Cette relation déterminera l'amplitude complexe de $\Delta\theta$.

En valeurs réelles, le rapport des amplitudes $\frac{1}{p}\cdot\frac{|\Delta C_m|}{|\Delta\theta|}$ sera donné par *le module* du facteur complexe :

$$[- K\Omega^2 + \Gamma + \mu\Omega i]$$

et le déphasage δ de l'oscillation $\Delta\theta$ en arrière de ΔC, sera égal *à l'argument* de ce facteur.

On aura donc

$$\left.\begin{array}{l} \frac{1}{p}\,|\Delta C_m| = |\Delta\theta|\sqrt{(\Gamma - K\Omega^2)^2 + \mu^2\Omega^2} \\ \operatorname{tg}\delta = \frac{\mu\Omega}{\Gamma - K\Omega^2} \end{array}\right\} \quad (14)\ bis$$

Interprétation de ces résultats. — Couple d'amortissement et couple synchronisant apparents.

On peut appeler *système oscillatoire simple*, un système dont le mouvement répond à l'équation différentielle linéaire du second degré à *coefficients constants*

$$K\frac{d^2}{dt^2}\Delta\theta + m\frac{d}{dt}\Delta\theta + g.\Delta\theta = \Delta f.$$

dans laquelle :

$K\frac{d^2}{dt^2}\Delta\theta$ représente le terme d'inertie

$m\frac{d}{dt}\Delta\theta$ le terme d'amortissement,

$g\Delta\theta$ le terme élastique,

Δf l'action extérieure.

L'oscillation libre d'un tel système est un terme sinusoïdal amorti, donné par l'équation caractéristique du 2e degré

$$Kz^2 + mz + g = 0$$

et l'oscillation forcée correspondant à une action pendulaire extérieure de la forme $\Delta f = \Delta f_0 e^{i\Omega t}$ sera donnée par

$$\Delta\theta(-K\Omega^2 + g + m\Omega i) = \Delta f. \qquad (15)$$

La machine synchrone, telle que nous la considérons ici, en tenant compte des fuites et des constantes de temps des courants d'amortissement, n'est pas *un système simple*, puisque l'oscillation dépend d'une équation caractéristique du 6e degré. Mais du point de vue des oscillations forcées, on peut la comparer à un système simple fictif en identifiant les relations analogues (14) et (15).

Cette identification montre que les valeurs Γ et μ de (13) seront, la première, le terme élastique, et la seconde le terme d'amortissement du système simple fictif équivalent à la machine synchrone pour les oscillations forcées.

On peut donc appeler :

Γ couple élastique ou synchronisant apparent ;

μ couple d'amortissement apparent.

Mais, alors que dans un système simple réel, les termes correspondants g et m sont *constants*, donc indépendants de la pulsation des oscillations, il n'en est plus de même ici. Les éléments Γ et μ du système fictif équivalent à la machine réelle, dépendent de la pulsation Ω des oscillations considérées.

Leurs expressions seront données par la relation (13) ; pour en obtenir les développements, il suffit d'expliciter les termes des polynômes (10) et (11) de $\mathfrak{M}(z)$ et $\mathcal{D}(z)$.

Les calculs ne présentent aucune difficulté, mais sont assez laborieux quand on veut tenir compte de la résistance de l'induit. Nous donnerons tout d'abord les résultats dans l'hypothèse où cette résistance est négligeable, ce qui est le cas le plus usuel. Nous étudierons ensuite l'influence de la résistance de l'induit, seule, abstraction faite des courants d'amortissement, et enfin nous envisagerons l'action simultanée des courants d'amortissement et de la résistance, en nous limitant aux oscillations lentes.

Expressions du couple d'amortissement et du couple synchronisant apparent, quand la résistance de l'induit est négligeable.

Faisons dans le déterminant caractéristique $\mathcal{D}(z)$, $r = 0$ et remplaçons F_{l_0}, F_{t_0}, X_0, Y_0, par les valeurs (1) et (2) qui s'écrivent alors :

$$F_{l_0} = \frac{U\sqrt{2}}{\omega}\cos\Psi \qquad F_{t_0} = \frac{U\sqrt{2}}{\omega}\sin\Psi$$

$$X_0 = -\frac{E\sqrt{2} - U\sqrt{2}\cos\Psi}{(s+A)\omega} \qquad Y_0 = \frac{U\sqrt{2}\sin\Psi}{(s+B)\omega}$$

$$\mathcal{D}(z) = \begin{vmatrix} Kz^2, & -\frac{3}{2}\frac{U\sqrt{2}}{\omega}\sin\Psi, & \frac{3}{2}\frac{U\sqrt{2}}{\omega}\cos\Psi, & \frac{3}{2}\frac{U\sqrt{2}\sin\Psi}{(s+B)\omega}, & \frac{3}{2}\frac{F\sqrt{2}-U\sqrt{2}\cos\Psi}{(s+A)\omega} \\ 0 & -(s+A)\left(1+\frac{\sigma_1}{\varepsilon_1}z\right) & 0 & \left(1+\frac{z}{\varepsilon_1}\right) & 0 \\ 0 & 0 & -(s+B)\left(1+\frac{\sigma_2}{\varepsilon_2}z\right) & 0 & \left(1+\frac{z}{\varepsilon_2}\right) \\ \frac{U\sqrt{2}}{\omega}(z\sin\Psi - \omega\cos\Psi), & 0, & 0 & z & \omega \\ -\frac{U\sqrt{2}}{\omega}(z\cos\Psi + \omega\sin\Psi), & 0, & 0 & -\omega & -z \end{vmatrix} \quad (16)$$

Développons ce déterminant par rapport à la première colonne; on aura :

$$\mathcal{D}(z) = Kz^2 . \mathcal{M}(z) - \frac{U\sqrt{2}}{\omega}(z\sin\Psi - \omega\cos\Psi) . \mathcal{N}(z)$$
$$- \frac{U\sqrt{2}}{\omega}(z\cos\Psi + \omega\sin\Psi)\,\mathcal{T}(z)$$

$\mathcal{M}$, $\mathcal{N}$, $\mathcal{T}$ étant les mineurs du 1[er] terme et des 4[e] et 5[e] termes de cette colonne.

Calculons ces mineurs en les développant par rapport à leur dernière ligne; il viendra :

$$\left.\begin{aligned} \mathcal{M}(z) &= \mathcal{L}(z)(\omega^2 + z^2) \\ \mathcal{N}(z) &= \mathcal{L}(z)[+\omega\mathcal{A}(z) - z\mathcal{B}(z)] \\ \mathcal{T}(z) &= \mathcal{L}(z)[-\omega\mathcal{B}(z) - z\mathcal{A}(z)] \end{aligned}\right\} \quad (17)$$

avec

$$\left.\begin{aligned} \mathcal{L}(z) &= (s+A)(s+B)\left(1+\frac{\sigma_1}{\varepsilon_1}z\right)\left(1+\frac{\sigma_2}{\varepsilon_2}z\right) \\ \mathcal{A}(z) &= \frac{3}{2}\left[\frac{F\sqrt{2} - U\sqrt{2}\cos\Psi}{(s+A)\omega} + \frac{U\sqrt{2}\cos\Psi}{(s+B)\omega}\left(1 + \frac{(1-\sigma_2)z}{\varepsilon + \sigma_2 z}\right)\right] \\ \mathcal{B}(z) &= \frac{3}{2}\left[-\frac{U\sqrt{2}\sin\Psi}{(s+B)\omega} + \frac{U\sqrt{2}\sin\Psi}{(s+A)\omega}\left(1 + \frac{(1-\sigma_1)z}{\varepsilon_1 + \sigma_1 z}\right)\right] \end{aligned}\right\} \quad (18)$$

En portant dans $\mathcal{D}(z)$ les valeurs (17) on a :

$$\mathcal{D}(z) = (z^2 + \omega^2)\mathcal{L}(z)\left[Kz^2 + \frac{U\sqrt{2}}{\omega}(\mathcal{A}(z)\cos\Psi + \mathcal{B}(z)\sin\Psi)\right]$$

et en remplaçant $\mathcal{A}$ et $\mathcal{B}$ par les valeurs ci-dessus, il vient finalement pour développement du déterminant caractéristique : (1)

(1) Ce développement a été donné par une autre méthode dans notre premier article Cf. Bulletin S.F.E. Décembre 1930, page 1318, formule 10 de la 2[e] partie.

$$\mathcal{D}(z) = (z^2 + \omega^2)\mathcal{L}(z)\left[Kz^2 + C_s + \frac{3U^2 \sin^2 \Psi}{(s+A)\omega^2} \cdot \frac{(1-\sigma_1)z}{(\varepsilon_1 + \sigma_1 z)} + \frac{3U^2 \cos^2 \Psi}{(s+B)\omega^2} \cdot \frac{(1-\sigma_2)z}{(\varepsilon_2 + \sigma_2 z)}\right] \quad (19)$$

C_s étant la valeur du couple synchronisant définie par (6) (6 *bis*).

Portons cette valeur de $\mathcal{D}(z)$ et celle de $\mathcal{M}(z)$ (formule 17) dans la formule (9 *bis*) qui est,

$$\frac{1}{p} \cdot \Delta C_m = \Delta\theta \, \frac{\mathcal{D}(z)}{\mathcal{M}(z)},$$

il viendra :

$$\frac{1}{p} \Delta C_m = \Delta\theta\left[Kz^2 + C_s + \frac{3U^2 \sin^2 \Psi}{(s+A)\omega^2} \frac{(1-\sigma_1)z}{(\varepsilon_1 + \sigma_1 z)} + \frac{3U^2 \cos^2 \Psi}{(s+B)\omega} \frac{(1-\sigma_2)z}{(\varepsilon_2 + \sigma_2 z)}\right] \quad (20)$$

et en remplaçant z par $i\Omega$,

$$\frac{1}{p} \Delta C_m = \Delta\theta[-K\Omega^2 + C_s + \gamma + \mu\Omega i]. \quad (21)$$

avec

$$\left.\begin{aligned} \gamma &= \frac{3U^2}{\omega^2}\left[\frac{\sin^2 \Psi}{(s+A)} \cdot \frac{(1-\sigma_1)\sigma_1\Omega^2}{(\varepsilon_1^2 + \sigma_1^2\Omega^2)} + \frac{\cos^2 \Psi}{(s+B)} \cdot \frac{(1-\sigma_2)\sigma_2\Omega^2}{(\varepsilon_2^2 + \sigma_2^2\Omega^2)}\right] \\ \mu &= \frac{3U^2}{\omega^2}\left[\frac{\sin^2 \Psi}{(s+A)} \cdot \frac{(1-\sigma_1)\varepsilon_1}{(\varepsilon_1^2 + \sigma_1^2\Omega^2)} + \frac{\cos^2 \Psi}{(s+B)} \cdot \frac{(1-\sigma_2)\varepsilon_2}{(\varepsilon_2^2 + \sigma_2^2\Omega^2)}\right] \end{aligned}\right\} \quad (22)$$

μ représente le couple d'amortissement apparent, et le couple synchronisant apparent est :

$$\Gamma = C_s + \gamma, \quad (23)$$

C_s étant donné par les formules (6), (6 *bis*) que nous récrivons :

$$C_s = 3\,\frac{U^2}{\omega^2}\left(\frac{\sin^2 \Psi}{(s+A)} + \frac{\cos^2 \Psi}{(s+B)}\right) + \frac{3UI \sin \varphi}{\omega}, \quad (6)$$

$$C_s = 3\left[\frac{EU \cos \Psi}{(s+A)\omega^2} + \frac{U^2}{\omega^2} \cos 2\Psi\left(\frac{1}{s+B} - \frac{1}{s+A}\right)\right] \quad (6\ bis)$$

Variations de ces couples apparents avec Ω. — On vérifie tout d'abord sur ces formules que pour les oscillations très lentes, lorsque Ω tend vers zéro, γ devient nul et le couple synchronisant apparent tend vers la valeur $\Gamma_0 = C_s$. Le couple d'amortissement tend dans les mêmes conditions vers la valeur :

$$\mu_0 = \frac{3U^2}{\omega^2}\left[\frac{\sin^2 \Psi}{(s+A)}\left(\frac{1-\sigma_1}{\varepsilon_1}\right) + \frac{\cos^2 \Psi}{(s+B)}\left(\frac{1-\sigma_2}{\varepsilon_2}\right)\right]. \quad (24)$$

Donc, pour les *oscillations lentes*, on aura :

$$[-K\Omega^2 + C_s + \mu_0\Omega i]\Delta\theta = \frac{1}{p}\cdot\Delta C_m, \tag{25}$$

c'est-à-dire

$$K\frac{d^2\Delta\theta}{dt^2} + \mu_0\frac{d\Delta\theta}{dt} + C_s\Delta\theta = \frac{1}{p}\Delta C_m. \tag{25 bis}$$

Cette approximation des oscillations lentes suppose que les termes $\sigma_1^2\Omega^2$, $\sigma_2^2\Omega^2$ des formules (22) sont négligeables devant les termes ε_1^2, ε_2^2.

Pour les oscillations très rapides au contraire (Ω très grand), μ tend vers zéro, γ tend vers la valeur

$$\gamma_1 = \frac{3U^2}{\omega^2}\left[\frac{\sin^2\Psi}{(s+A)}\left(\frac{1-\sigma_1}{\sigma_1}\right) + \frac{\cos^2\Psi}{(s+B)}\left(\frac{1-\sigma_2}{\sigma_2}\right)\right], \tag{26}$$

et d'après l'expression (6) de C_s qui est :

$$C_s = \frac{3U^2}{\omega^2}\left[\frac{\sin^2\Psi}{(s+A)} + \frac{\cos^2\Psi}{(s+B)}\right] + \frac{3UI\sin\varphi}{\omega},$$

le couple synchronisant apparent devient égal à :

$$\Gamma_1 = C_s + \gamma_1 = \frac{3U^2}{\omega^2}\left[\frac{\sin^2\Psi}{(s+A)\sigma_1} + \frac{\cos^2\Psi}{(s+B)\sigma_2}\right] + \frac{3UI\sin\varphi}{\omega}. \tag{27}$$

En comparant ces deux dernières expressions, on voit que l'on passe du couple $\Gamma_0 = C_s$ des oscillations lentes, à la valeur limite Γ_1 des oscillations très rapides, en remplaçant simplement dans (6) les inductances totales $(s+A)$, $(s+B)$ par les selfs de fuites $(s+A)\sigma_1$, $(s+B)\sigma_2$.

Quand Ω croît de zéro à l'infini, le couple synchronisant apparent croît régulièrement de la valeur C_s à la valeur Γ_1 et le couple d'amortissement décroît de μ_0 à zéro.

Représentation géométrique. — L'analogie évidente entre les formules (22) et les formules classiques du moteur asynchrone ordinaire, montre que les courants d'amortissement, direct et transversal, agissent comme les rotors de deux moteurs asynchrones qui auraient pour glissement $\frac{\Omega}{\omega}$ et dont les éléments de fonctionnement : tension et self primaires, dispersion...... seraient respectivement.

$U\sin\Psi$,	$(s+A)$,	σ_1,	ε_1
$U\cos\Psi$,	$(s+B)$,	σ_2,	ε_2.

On pourra donc représenter les formules (22) par deux diagrammes circulaires.

Posons, en effet :

$$\frac{\sigma_1}{\varepsilon_1}\Omega = \operatorname{tg}\beta_1, \qquad \frac{\sigma_2}{\varepsilon_2}\Omega = \operatorname{tg}\beta_2.$$

Il viendra :

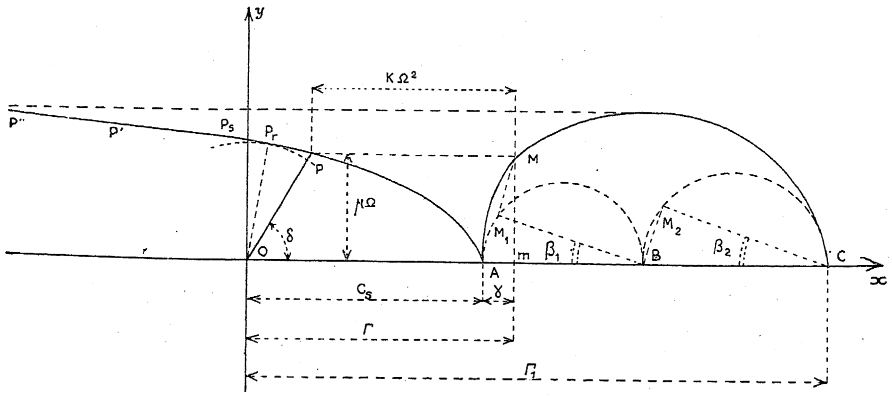
$$\left.\begin{aligned}\gamma &= \frac{3U^2}{\omega^2}\left[\frac{\sin^2\Psi}{(s+A)}\left(\frac{1-\sigma_1}{\sigma_1}\right)\sin^2\beta_1 + \frac{\cos^2\Psi}{(s+B)}\left(\frac{1-\sigma_2}{\sigma_2}\right)\sin^2\beta_2\right]\\ \mu\Omega &= \frac{3U^2}{\omega^2}\left[\frac{\sin^2\Psi}{(s+A)}\left(\frac{1-\sigma_1}{\sigma_1}\right)\sin\beta_1\cos\beta_1 + \frac{\cos^2\Psi}{(s+B)}\left(\frac{1-\sigma_2}{\sigma_2}\right)\sin\beta_2\cos\beta_2\right]\end{aligned}\right\} \quad (28)$$

Traçons deux demi-circonférences, l'une de diamètre :

$$AB = \frac{3U^2}{\omega^2}\cdot\frac{\sin^2\Psi}{(s+A)}\cdot\left(\frac{1-\sigma_1}{\sigma_1}\right),$$

l'autre de diamètre :

$$BC = \frac{3U^2}{\omega^2}\,\frac{\cos^2\Psi}{(s+B)}\left(\frac{1-\sigma_2}{\sigma^2}\right) \qquad \text{(Voir figure)}$$



et formons les angles :

$$\widehat{ABM_1} = \beta_1, \qquad \widehat{ABM_2} = \beta_2.$$

Les projecteurs du vecteur AM_1 sur Ox et Oy sont respectivement :

$$AB\sin^2\beta_1, \qquad AB\sin\beta_1\cos\beta_1,$$

celles du vecteur BM_2 sont de même :

$$BC\sin^2\beta_2, \qquad BC\sin\beta_2\cos\beta_2.$$

Ajoutons ces vecteurs en traçant M_1M équipollent à BM_2 ; les projections du vecteur résultant AM auront pour expressions :

$$\text{sur } Ox : AB\sin^2\beta_1 + BC\sin^2\beta_2,$$
$$\text{sur } Oy : AB\sin\beta_1\cos\beta_1 + BC\sin\beta_2\cos\beta_2.$$

Ce sont les valeurs (28) de γ et $\mu\Omega$.

Si l'origine O est placée à une distance de A, $OA = C_s$, la valeur de l'abscisse Om du point M mesurera directement le couple synchro-

nisant apparent $\Gamma = C_s + \gamma$ et l'ordonnée Mm donnera le terme d'amortissement : $\mu\Omega$.

Quand Ω varie, les points M_1, M_2 décrivent les deux demi-circonférences et M décrit une courbe qui part de A pour $\Omega = 0$ et aboutit à C pour $\Omega = \infty$.

L'abscisse du point C est égale à la valeur limite du couple synchronisant apparent, L_1, donnée par la formule (27).

On voit par cette représentation géométrique, que le terme d'amortissement $\mu\Omega$ correspond à la puissance active en jeu dans les courants d'amortissement et qu'il passe par un maximum quand Ω varie de zéro à l'infini. Le terme γ du couple synchronisant est lié au contraire à la puissance réactive.

On peut également représenter géométriquement la formule (21)

$$\frac{1}{p}\,\Delta C_m = \Delta\theta\left[-K\Omega^2 + \Gamma + \mu\Omega i\right] \tag{21}$$

qui donne en valeurs réelles :

$$\frac{1}{p}\,|\,\Delta C_m\,| = |\,\Delta\theta\,|\sqrt{(\Gamma - K\Omega^2)^2 + \mu^2\Omega^2}.$$

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\mu\Omega}{\Gamma - K\Omega^2}.$$

Il suffit de porter à partir du point M, parallèlement à l'axe Ox et dans le sens négatif la longueur

$$MP = K\Omega^2$$

L'abscisse du point P sera égale à $(\Gamma - K\Omega^2)$ partie réelle du facteur complexe de la formule (17). L'ordonnée de P égale à $\mu\Omega$ sera la partie imaginaire.

L'argument de ce facteur sera l'angle

$$\widehat{xOP} = \delta$$

qui mesurera le déphasage de l'oscillation $\Delta\theta$, en arrière de ΔC. Le module est égal à la longueur OP, donc l'amplitude réelle de $\Delta\theta$ sera donnée par :

$$\Delta\theta = \frac{\Delta C_m}{p}\cdot\frac{1}{OP}.$$

Quand Ω croît de zéro à l'infini, le point M décrivant la courbe AMC et la différence d'abscisses $MP = K\Omega^2$ croissant constamment, on voit que le point P décrira une courbe APP'P'' ayant l'allure indiquée sur la figure.

Cette courbe coupe l'axe des y en un point P_s. La pulsation Ω_s cor-

respondant à ce point donnera, une oscillation du rotor en quadrature avec l'oscillation du couple $\left(\delta = \frac{\pi}{2}\right)$.

Résonance. — Cette courbe permet également de déterminer la pulsation de résonance. Pour une valeur donnée de ΔC, l'amplitude réelle de l'oscillation du rotor varie avec Ω proportionnellement à l'inverse de OP. Donc la pulsation qui rendra $\Delta\theta$ maximum, dite *pulsation de résonance*, correspondra au point P_r de rayon vecteur OP_r minimum.

Lorsque la machine n'a pas de courants d'amortissement,

$$(\sigma_1 = \sigma_2 = 1)$$

le point de résonance est donné simplement par

$$C_s - K\Omega^2 = 0.$$

Il se confond alors avec le point d'oscillation en quadrature P_s et la pulsation correspondante, coïncide avec celle de l'oscillation libre de la machine. Le phénomène de résonance est alors maximum, puisque théoriquement l'amplitude $\Delta\theta$ devient infinie.

Quand l'amortissement est appréciable, la pulsation de résonance Ω_r est distincte de Ω_s, et s'écarte également de la valeur de la pulsation de l'oscillation libre ; la résonance est atténuée. Elle peut même disparaître entièrement si l'amortissement est très élevé.

Oscillations des courants. — Tout ce qui précède s'applique au calcul de l'oscillation $\Delta\theta$ du rotor. On calculerait de même les oscillations des courants ΔX, ΔY, en explicitant les formules (7) qui donnent .

$$\Delta X = -\frac{\Delta C_m}{p} \cdot \frac{\mathcal{M}'(z)}{\mathcal{D}(z)}, \qquad \Delta Y = \frac{\Delta C_m}{p} \cdot \frac{\mathcal{M}''(z)}{\mathcal{D}(z)}.$$

Etouffement des oscillations très rapides. — On vérifie sur les formules obtenues, le fait bien connu que les oscillations très rapides du couple sont étouffées par l'inertie du rotor, et par suite sans influence appréciable sur le fonctionnement de la machine. En effet, $\mathcal{D}(z)$, le dénominateur de $\Delta\theta$, ΔX, ΔY, est du 6ᵉ degré en z, tandis que les mineurs $\mathcal{M}(z)$, $\mathcal{M}'(z)$, $\mathcal{M}''(z)$ qui sont en numérateur, ne contenant pas le terme d'inertie $K\Omega^2$ ne sont que du 4ᵉ degré en z, donc quand $z = i\Omega$ augmente indéfiniment, les rapports :

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta C_m}, \frac{\Delta X}{\Delta C_m}, \frac{\Delta Y}{\Delta C_m}$$ tendent rapidement vers zéro.

Rapprochement entre nos résultats et celui de M. Putman. — M. H. V. Putman a étudié en 1926, l'influence de la pulsation des oscillations

forcées, sur la valeur du couple synchronisant apparent, en se limitant au cas d'une machine sans amortissement transversal [1].

Il donne une expression du couple synchronisant apparent, quand r est négligeable [2] qui s'écrit avec nos notations :

$$\Gamma = \frac{3EU \cos \Psi}{(s+A)\omega^2} + \frac{3U^2}{\omega^2} \cos 2\Psi \left(\frac{1}{s+B} - \frac{1}{x_e} \right) + \frac{3U^2}{\omega^2} \cos^2 \Psi \left(\frac{1}{x_e} - \frac{1}{s+A} \right).$$

La réactance x_e entrant dans cette formule, est une réactance, variable avec la pulsation Ω des oscillations considérées, dont M. Putman donne l'expression, et qui est toujours inférieure à la réactance directe $(s + A)$ (désignée par x_s dans l'article de cet auteur).

La valeur de Γ que nous avons obtenue (formules 18-19) peut se mettre, quand il n'y a pas d'amortissement transversal $(\sigma_2 = 1)$ sous une forme analogue à celle de M. Putman.

En effet, ces formules donnent avec $\sigma_2 = 1$

$$\Gamma = C_s + \frac{3U^2}{\omega^2} \frac{\sin^2 \Psi}{(s+A)} \frac{(1-\sigma_1)\sigma_1\Omega^2}{(\varepsilon_1^2 + \sigma_1^2\Omega^2)}.$$

C'est-à dire en posant $x_e = (s+A) \dfrac{\varepsilon_1^2 + \sigma_1^2\Omega^2}{\varepsilon_1^2 + \sigma_1\Omega^2}$ (29)

$$\Gamma = C_s + \frac{3U^2}{\omega^2} \sin^2 \Psi \left(\frac{1}{x^2} - \frac{1}{s+A} \right).$$

Et en remplaçant C_s par sa valeur (6 *bis*) il vient :

$$\Gamma = \frac{3EU \cos \Psi}{(s+A)\omega^2} + \frac{3U^2}{\omega^2} \cos 2\Psi \left(\frac{1}{s+B} - \frac{1}{s+A} \right) + \frac{3U^2}{\omega^2} \sin^2 \Psi \left(\frac{1}{x_e} - \frac{1}{s+A} \right).$$

Ce qui peut encore s'écrire :

$$\Gamma = \frac{3EU \cos \Psi}{(s+A)\omega^2} + \frac{3U^2}{\omega^2} \cos 2\Psi \left(\frac{1}{s+B} - \frac{1}{x_e} \right) + \frac{3U^2}{\omega^2} \cos^2 \Psi \left(\frac{1}{x_e} - \frac{1}{s+A} \right).$$

Cette expression est bien de la même forme que celle donnée par M. Putman.

---

(1) H. V. Putman, Synchronizing power of synchronous machines. *Journal of association of Institute electrical engineers*, New-York, décembre 1923, pages 1229 1237.

(2) H. V. Putman, *loc. cit.*, formule 36, page 1233. Voir également l'article suivant où cette formule est utilisée :

Galmiche. Fonctionnement en parallèle d'un nombre quelconque de machines synchrones R.G.E., 12 juillet 1930, pages 45-46, formule 34.

Toutefois nous signalerons que les formules données par M. Putman pour définir x_e (1) nous paraissent conduire à une valeur différente de la valeur (29) donnée ci-dessus).

Expressions du couple d'amortissement et du couple synchronisant apparents dans une machine sans courants d'amortissement, en tenant compte de la résistance de l'induit.

Nous avons démontré dans notre première étude, 3e partie (2) qu'en faisant abstraction des courants d'amortissement, c'est-à-dire en posant $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \infty$, le déterminant caractéristique des oscillations, a pour développement :

$$\mathcal{D}(z) = (Kz^2 + C_s)\left(1 + \frac{z}{\omega}\sin 2\alpha\left(\frac{\lambda^2+1}{2\lambda}\right) + \frac{z^2}{\omega^2}\cos^2\alpha\right) \cdots\cdots - zN_1\frac{\sigma\omega}{\gamma}\sin 2\alpha - N_0\sin^2\alpha,$$

avec

$$\left.\begin{aligned} \operatorname{tg}^2\alpha &= \frac{r^2}{(S+A)(S+B)\omega^2} \qquad \lambda^2 = \frac{S+B}{S+A} \\ N_0 &= \frac{3}{2}\left[(S+B)P_0^2 + (S+A)Q_0^2\right] \\ N_1 &= \frac{3}{2}(S+A)(P_0^2+Q_0^2). \end{aligned}\right\} \quad (30)$$

On voit que le mineur $\mathcal{M}(z)$ du terme Kz^2 est :

$$\mathcal{M}(z) = \left[1 + \frac{z}{\omega}\sin 2\alpha\left(\frac{\lambda^2+1}{2\lambda}\right) + \frac{z^2}{\omega^2}\cos^2\alpha\right].$$

Avec ces formules, l'équation des oscillations forcées stationnaires de pulsation Ω, qui est d'après (9 *bis*)

$$\frac{1}{p}\Delta C_m = \Delta\theta\frac{\mathcal{D}(i\Omega)}{\mathcal{M}(i\Omega)},$$

s'écrira tous calculs faits

$$\frac{1}{p}\Delta C_m = \Delta\theta\left[-K\Omega^2 + \mu\Omega i + C_s + \gamma\right].$$

avec :

---

(1) H. V. Putman, *loc. cit.*, formules 37 et 47, pages 1233-1234.
(2) *Bulletin S. F. E.*, décembre 1930, page 1330, formules (2), (3), de la 3e partie.

$$\left.\begin{aligned}\gamma &= -\,N_0 \sin^2\alpha \,\frac{1+\dfrac{\Omega^2}{\omega^2}\cos^2\alpha\left(\dfrac{N_1}{N_0}\,2(\lambda^2+1)-1\right)}{\left[\left(1-\dfrac{\Omega^2}{\omega^2}\cos^2\alpha\right)^2+\dfrac{\Omega^2}{\omega^2}\left(\dfrac{\lambda^2+1}{2\lambda}\right)^2\sin^2 2\alpha\right]}\\ \mu &= \frac{\lambda\sin 2\alpha}{2\omega}\cdot\frac{\left[-N_1+\sin^2\alpha . N_0\left(\dfrac{1+\lambda^2}{\lambda^2}\right)+\cos^2\alpha . N_1\,\dfrac{\Omega^2}{\omega^2}\right]}{\left[\left(1-\dfrac{\Omega^2}{\omega^2}\cos^2\alpha\right)^2+\dfrac{\Omega^2}{\omega^2}\left(\dfrac{\lambda^2+1}{2\lambda}\right)^2\sin^2 2\alpha\right]}\end{aligned}\right\} \quad (31)$$

Pour les oscillation lentes, on aura en négligeant les termes en $\dfrac{\Omega^2}{\omega^2}$:

$$\left.\begin{aligned}\gamma_0 &= -\,N_0\sin^2\alpha\\ \mu_0 &= -\frac{\lambda\sin 2\alpha}{2\omega}\left[N_1-\sin^2\alpha N_0\left(\frac{1+\lambda^2}{\lambda^2}\right)\right]\end{aligned}\right\} \quad (31\ bis)$$

Amortissement négatif. — Pour les valeurs usuelles de la résistance, qui sont faibles vis-à-vis de l'inductance, l'angle α est petit, donc dans l'expression du coefficient μ_0, le terme en N est prépondérant, et par suite *ce coefficient d'amortissement est négatif*. Les oscillations lentes du rotor seront donc déphasées en avant des oscillations du couple.

Pour les oscillations plus rapides, d'après (31) μ croissant avec Ω s'annulera pour les valeurs Ω_l définies par

$$\Omega_l^2 = \frac{\omega^2}{\cos^2\alpha}\left[1-\sin^2\alpha\,\frac{N_0}{N_1}\left(\frac{1+\lambda^2}{\lambda^2}\right)\right], \quad (32)$$

et les oscillations de pulsation supérieure à Ω_l auront un terme d'amortissement positif.

Si la résistance de l'induit est suffisamment élevée pour que l'on ait :

$$\sin^2\alpha > \frac{N_1}{N_0}\cdot\frac{\lambda^2}{(1+\lambda^2)},$$

l'amortissement négatif disparaît, μ est toujours positif.

Dans le cas d'une machine à réactions égales

$$(S+A) = (S+B) = L.$$

On a d'après (30) $\gamma = 1$, $N_0 = N_1$, et la condition ci-dessus donne :

$$\sin^2\alpha > \frac{1}{2} \qquad \text{donc} \qquad \alpha > 45°.$$

Donc si $r > L\omega$ les oscillations forcées ont un terme d'amortissement négatif, tant que la pulsation est inférieure à la valeur (32), c'est-à-dire

$$\Omega_l^2 = \omega^2\left(1-\frac{r^2}{L^2\omega^2}\right).$$

Quand r est supérieur à $L\omega$, l'amortissement négatif disparaît,

Nous retrouvons là les conditions *approchées* de la stabilité du mouvement libre, étudiées directement dans notre premier article (1).

Cette existence, dans l'équation des oscillations stationnaires, d'un terme d'amortissement négatif dû à la résistance de l'induit a été démontrée par M. Boucherot en 1913 (2) et cet auteur admettant que l'équation des oscillations stationnaires s'appliquait en première approximation au mouvement libre, en avait conclu dès cette époque, à l'influence défavorable de la résistance sur la stabilité de l'oscillation libre.

Comme il s'agit en l'espèce d'un terme de divergence très faible, ce raisonnement approché, qui fait abstraction de la complexité du mouvement libre réel, pouvait laisser place à quelque doute.

La démonstration *directe* de l'instabilité du mouvement libre, due à la résistance, par la méthode exposée dans notre première étude, lève toute incertitude à cet égard, et complète les résultats de M. Boucherot.

On notera à ce sujet que la condition exacte de stabilité de l'oscillation libre (3) est un peu différente de la condition déduite du terme d'amortissement des oscillations stationnaires.

Expression du terme d'amortissement des oscillations lentes, en tenant compte a la fois des courants d'amortissement et de la résistance de l'induit.

Le calcul du coefficient des oscillations stationnaires

$$\frac{\mathcal{D}(i\Omega)}{\mathcal{M}(i\Omega)}$$

conduit dans le cas général à des formules très complexes.

Nous nous contenterons d'envisager *le cas des oscillations lentes*, c'est-à-dire que nous négligerons dans le développement suivant les puissances de $z = i\Omega$, les termes en z^2 autres que le terme d'inertie Kz^2, et les termes de degré supérieur à 2.

Nous nous placerons en outre dans l'hypothèse d'une machine à réactions égales.

On a alors

$$(S + A) = (S + B) = \Gamma,$$

(1) *Bulletin S.F.E.*, décembre 1930, 1332-1333, formules (8) de la 3e partie.
(2) P. Boucherot. — Amortissement et amortisseurs des alternateurs. *La lumière électrique*, 22 novembre 1913, pages 235 et suivantes.
(3) *Bulletin S.F.E.*, décembre 1930, page 1333 et 1336, formules 9 et 14 de la 3e partie

et d'après (1), (2) et (4)

$$P_0 = \frac{E\sqrt{2}}{L\omega}, \qquad F_{l_0} = \cos\alpha\cos(\Psi-\alpha)\frac{U\sqrt{2}}{\omega} + \frac{E\sqrt{2}}{\omega}\sin^2\alpha,$$

$$Q_0 = 0, \qquad F_{t_0} = \cos\alpha\sin(\Psi-\alpha)\frac{U\sqrt{2}}{\omega} + \sin\alpha\cos\alpha\frac{E\sqrt{2}}{\omega}.$$

Il est commode pour la simplicité des calculs de partir, non pas de l'expression (8) du déterminant $\mathcal{D}(z)$, mais de l'expression équivalente donnée dans notre premier article [1] que nous récrivons ci-dessous :

$$\mathcal{D}(z) = \begin{vmatrix} \frac{2}{3}(Kz^2 + C_s) & \frac{F_{l_0}}{(S+A)} & -\frac{F_{l_0}}{(S+B)} & Q_0 & P_0 \\ -F_{l_0}\left(\frac{1-\sigma_1}{\varepsilon_1}\right)z & 1+\frac{\sigma_1}{\varepsilon_1}z & 0 & \left(\frac{1-\sigma_1}{\varepsilon_1}\right)z & 0 \\ F_{l_0}\left(\frac{1-\sigma_2}{\varepsilon_2}\right)z & 0 & \left(1+\frac{\sigma_2}{\varepsilon_2}z\right) & 0 & \left(\frac{1-\sigma_2}{\varepsilon_2}\right)z \\ rQ_0 & -\frac{r}{S+A} & 0 & \left(z+\frac{r}{S+A}\right) & \omega \\ rP_0 & 0 & -\frac{r}{S+B} & -\omega & \left(z+\frac{r}{S+B}\right) \end{vmatrix}$$

Il vient tous calculs effectués à l'approximation admise :

$$\frac{\mathcal{D}(z)}{\mathcal{M}(z)} = -K\Omega^2 + \mu_0\Omega i + \Gamma_0$$

avec :

$$\Gamma_0 = \frac{3EU}{L\omega^2}\cos\alpha.\cos(\Psi-\alpha),$$

$$\mu_0 = \frac{3U^2\cos^2\alpha}{L\omega^3}\left[\frac{(1-\sigma_1)\omega}{\varepsilon_1}\cdot\sin^2(\Psi-\alpha) + \frac{(1-\sigma_2)\omega}{\varepsilon_2}\cos^2(\Psi-\alpha)\ldots\ldots + 2\frac{E}{U}\frac{(1-\sigma_1)\omega}{\varepsilon_1}\sin\alpha.\sin(\Psi-\alpha) - \frac{E^2}{U^2}\cdot\operatorname{tg}\alpha(1-2\sin^2\alpha)\right].$$

Si on néglige la résistance de l'induit ($\alpha = 0$), il ne reste que les deux premiers termes, toujours positifs, qui représentent l'action des courants d'amortissement et correspondent à la formule (24) obtenue précédemment.

L'action de la *résistance seule*, abstraction faite des courants d'amortissement est donnée par le dernier terme

$$-\frac{E^2}{U^2}\operatorname{tg}\alpha(1-2\sin^2\alpha)$$

correspondent à la formule (31 *bis*) du paragraphe précédent.

---

(1) *Bulletin S.F.E.*, 4e série (tome X), n° 112, décembre 1930, page 1317, formule (5) de la 2e partie.

Le terme mixte :

$$2\,\frac{E}{U}\cdot\frac{(1-\sigma_1)\omega}{\varepsilon_1}\,\sin\alpha.\sin(\Psi-\alpha)$$

est positif dans la marche en génératrice, et négatif dans la marche en moteur.

Dans le cas de la marche à vide $\Psi = 0$ et $E = U$, l'amortissement prend la valeur :

$$\mu_0 = \frac{3U^2\cos^2\alpha}{L\omega^3}\left[\frac{(1-\sigma_2)\omega}{\varepsilon_2}\cdot\cos^2\alpha - \frac{(1-\sigma_1)\omega}{\varepsilon_1}\sin^2\alpha - \operatorname{tg}\alpha(1-2\sin^2\alpha)\right].$$

DEUXIÈME PARTIE

Oscillations forcées provoquées par des variations périodiques de la phase et de la valeur efficace, de la tension aux bornes.

Les variations des tensions des phases, u_1, u_2, u_3, interviennent dans les équations des oscillations (A), (B) par les termes des seconds membres des deux dernières équations :

$$\sum\frac{2}{3}\,\Delta u\cos\theta_0,\qquad \sum\frac{2}{3}\,\Delta u\sin\theta_0$$

que nous avons supposés nuls dans l'étude précédente.

Pour calculer les oscillations forcées correspondantes, il suffira de résoudre le système linéaire (B) en fonction de ces termes, tandis que la variation du couple ΔC_m sera ici supposée nulle.

Il viendra donc pour valeur de $\Delta\theta$:

$$\Delta\theta\,.\,\mathfrak{D}(z) = \mathfrak{N}(z)\sum\frac{2}{3}\,\Delta u\cos\theta_0 - \mathfrak{T}(z)\sum\frac{2}{3}\,\Delta u\sin\theta_0 \qquad \textbf{(33)}$$

$\mathfrak{N}(z)$ et $\mathfrak{T}(z)$ désignant les mineurs des 4e et 5e termes de la première colonne de $\mathfrak{D}(z)$ formule (8).

Les deux expressions $\sum\frac{2}{3}\Delta u\cos\theta_0$, $\sum\frac{2}{3}\Delta u\sin\theta_0$ entrant dans ces formules peuvent très simplement, s'exprimer sous forme linéaire, à coefficients constants, en fonction d'une variation de tension efficace, et d'une variation de déphasage de la tension dans les trois phases.

En effet, considérons la tension normale dans l'une des phases :

$$u_1 = U\sqrt{2}\cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \Psi\right).$$

Supposons que la valeur efficace de cette tension varie de ΔU, et le déphasage de $\Delta\chi$. Il viendra :

$$\Delta u_1 = (U + \Delta U)\sqrt{2}\cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \Psi + \Delta\chi\right) - U\sqrt{2}\cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \Psi\right),$$

d'où en développant et en négligeant les carrés et doubles produits des variations infiniment petites :

$$\Delta u_1 = \Delta U\sqrt{2}.\cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \Psi\right) - \Delta\chi.U\sqrt{2}\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \Psi\right)$$

Admettons que ces mêmes variations ΔU, $\Delta\chi$ agissent simultanément dans les trois phases et qu'il s'y ajoute une variation Δu_m identique dans les trois phases, on aura pour expressions de Δu_1, Δu_2, Δu_3.

$$\Delta u_1 = \Delta u_m + \Delta U\sqrt{2}\cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \Psi\right) - \Delta\chi\, U\sqrt{2}\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \Psi\right)$$

$$\Delta u_2 = \Delta u_m + \Delta U\sqrt{2}\cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2} - \Psi\right) - \Delta\chi.U\sqrt{2}\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2} - \Psi\right)$$

$$\Delta u_3 = \Delta u_m + \Delta U\sqrt{2}\cos\left(\omega t + \frac{4\pi}{3} - \frac{\pi}{2} - \Psi\right) - \Delta\chi.U\sqrt{2}\sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3} - \frac{\pi}{2} - \Psi\right)$$

Ces relations définissent les valeurs de Δu_1, Δu_2, Δu_3, en fonction de trois valeurs quelconques Δu_m, ΔU, $\Delta\chi$ ou inversement.

En les multipliant respectivement par les cosinus, puis par les sinus des angles

$$\theta_{01} = \omega t, \qquad \theta_{02} = \omega t + \frac{2\pi}{3}, \qquad \theta_{03} = \omega t + \frac{4\pi}{3}$$

il vient :

$$\left.\begin{aligned} -\sum\frac{2}{3}\Delta u\cos\theta_0 &= -U\sqrt{2}\cos\Psi.\Delta\chi + U\sqrt{2}\sin\Psi\frac{\Delta U}{U} \\ -\sum\frac{2}{3}\Delta u\sin\theta_0 &= U\sqrt{2}\sin\Psi.\Delta\chi - U\sqrt{2}\cos\Psi\frac{\Delta U}{U} \end{aligned}\right\}$$

On a bien ainsi des formes linéaires et à coefficients constants, en fonction de ΔU et $\Delta\chi$. Comme il est naturel, la variation Δu_m de la tension moyenne $\frac{u_1 + u_2 + u_3}{3}$, n'intervient pas dans les oscillations.

En portant ces expressions dans (33), il vient :

$$\Delta\theta\ \mathfrak{D}(z) = \Delta\chi[-\mathfrak{N}(z)\cos\Psi + \mathfrak{T}(z)\sin\Psi]U\sqrt{2} + \frac{\Delta U}{U}[\mathfrak{N}(z)\sin\Psi - \mathfrak{T}(z)\cos\Psi]U\sqrt{2}.$$

Nous développerons cette formule, pour les oscillations stationnaires de pulsation donnée Ω, dans l'hypothèse où la résistance de l'induit est négligeable. Les mineurs $\mathfrak{N}(z)$ et $\mathfrak{T}(z)$ sont alors donnés par les formules (17) et (18).

Avec $z = i\Omega$, il vient tous calculs faits :

$$[-K\Omega^2 + C_s + \gamma + \mu\Omega i]\Delta\theta$$
$$= \left[\Delta\chi(M + M'\Omega i) - \frac{\Delta U}{U}(N + N'\Omega i)\right]\frac{\omega^2}{(\omega^2 - \Omega^2)} \quad (33\ bis)$$

avec

$$M = C_s + \gamma - \mu'\frac{\Omega^2}{\omega}; \qquad M' = \mu + \frac{D_s}{\omega} - \frac{\gamma'}{\omega}$$
$$N = D_s + \gamma' + \mu\frac{\Omega^2}{\omega}; \qquad N' = \mu' - \frac{C_s}{\omega} - \frac{\gamma}{\omega}.$$

Les grandeurs C_s, γ, μ ont été définies dans le chapitre précédent (formules (6'), 6 *bis*), (22)). Nous les rappelons ici :

$$\left.\begin{aligned}
C_s &= \frac{3EU\cos\Psi}{(s+A)\omega^2} + \frac{3U^2}{\omega^2}\cos 2\Psi\left(\frac{1}{s+B} - \frac{1}{s+A}\right) = \frac{\partial C_0}{\partial\Psi}\\
\gamma &= \frac{3U^2}{\omega^2}\left[\frac{\sin^2\Psi}{(s+A)}(1-\sigma_1)\frac{\sigma_1\Omega^2}{\varepsilon_1^2 + \sigma_1^2\Omega^2} + \frac{\cos^2\Psi}{(s+B)}(1-\sigma_2)\frac{\sigma_2\Omega^2}{\varepsilon_1^2 + \sigma_1^2\Omega^2}\right]\\
\mu &= \frac{3U^2}{\omega^2}\left[\frac{\sin^2\Psi}{(s+A)}(1-\sigma_1)\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1^2 + \sigma_1^2\Omega^2} + \frac{\cos^2\Psi}{(s+B)}(1-\sigma_2)\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_2^2 + \sigma_2^2\Omega^2}\right]
\end{aligned}\right\} (34)$$

Les grandeurs D_s, γ', μ', ont pour expressions :

$$\left.\begin{aligned}
D_s &= \frac{3EU\sin\Psi}{(s+A)\omega^2} + \frac{3U^2}{\omega^2}\sin 2\Psi\left(\frac{1}{s+B} - \frac{1}{s+A}\right) = U\frac{\partial C_0}{\partial U}\\
\gamma' &= \frac{3U^2}{\omega^2}\cdot\sin\Psi\cdot\cos\Psi\left[\frac{(1-\sigma_2)\sigma_2\Omega^2}{(s+B)(\varepsilon_2^2+\sigma_2^2\Omega^2)} - \frac{(1-\sigma_1)\sigma_1\Omega}{(s+A)(\varepsilon_1^2+\sigma_1^2\Omega^2)}\right]\\
\mu' &= \frac{3U^2}{\omega^2}\sin\Psi\cdot\cos\Psi\left[\frac{(1-\sigma_2)\varepsilon_2}{(s+B)(\varepsilon_2^2+\sigma_2^2\Omega^2)} - \frac{(1-\sigma_1)\varepsilon_1}{(s+A)(\varepsilon_1^2+\sigma_1^2\Omega^2)}\right]
\end{aligned}\right\} (34\ bis)$$

On notera que les deux termes D_s et C_s ne dépendent pas de la pulsation Ω de l'oscillation et correspondent aux deux dérivées partielles de l'expression C_0 du couple en régime permanent, suivant les formules :

$$C_s = \frac{\partial C_0}{\partial\psi}, \qquad D_s = U\frac{\partial C_0}{\partial U}.$$

Remarque. — Résonance pour $\Omega = \omega$. — La présence dans la formule (33 *bis*) du terme $(\omega^2 - \Omega^2)$ en dénominateur, montre qu'indépendamment du phénomène de résonance lié au minimum du module du facteur $[-K\Omega^2 + C_s + \gamma + \mu\Omega i]$ et qui existe ici comme dans le chapitre précédent, il y aura, en outre, résonance pour la valeur $\Omega = \omega$ qui correspond *aux vibrations rapides* de l'oscillation libre dont nous avons parlé dans notre premier mémoire. Pour $\Omega = \omega$, $\Delta\theta$, devient théoriquement infini, parce que nous avons négligé dans nos formules la résistance de l'induit, qui en réalité, amortirait la vibration rapide comme nous l'avons montré, et limiterait par suite l'amplitude de la résonance.

Oscillations lentes. — Quand la pulsation Ω est suffisamment petite pour que Ω^2, $\sigma_1\Omega^2$, $\sigma_2\Omega^2$ soient respectivement négligeables devant ω_1^2, ε_1^2, ε_2^2, on peut écrire :

$$\gamma = \gamma' = 0.$$

$$\left.\begin{aligned} \mu = \mu_0 &= \frac{3U^2}{\omega^2}\left[\frac{\sin^2\psi}{(S+A)}\cdot\frac{(1-\sigma_1)}{\varepsilon_1} + \frac{\cos^2\psi}{(S+B)}\cdot\frac{(1-\sigma_2)}{\varepsilon_1}\right] \\ \mu' = \mu'_0 &= \frac{3U^2}{\omega^2}\sin\psi\cos\psi\left[\frac{1}{S+B}\,\frac{(1-\sigma_2)}{\varepsilon_2} - \frac{1}{S+A}\,\frac{(1-\sigma_1)}{\varepsilon_1}\right] \end{aligned}\right\}. \quad (35)$$

Les termes $\frac{D_s}{\omega}$, $\frac{C_s}{\omega}$, sont de plus négligeables devant μ_0, μ'_0 et dans ces conditions l'équation (33) peut s'écrire

$$[-K\Omega^2 + C_s + \mu_0\Omega i]\Delta\theta = \Delta\chi[C_s + \mu_0\Omega i] - \frac{\Delta U}{U}[D_s + \mu'_0\Omega i] \quad (36)$$

Si en outre, on néglige les termes d'amortissement en Ωi, cette formule se réduit à

$$[-K\Omega^2 + C_s]\Delta\theta = C_s\,\Delta\chi - D_s\,\frac{\Delta U}{U}.$$

Oscillations des courants. — Oscillations rapides purement électriques. — En résolvant dans les mêmes conditions le système linéaire (B) par rapport à ΔX, ΔY, on formera les expressions de ces oscillations des courants en fonction de $\frac{\Delta U}{U}$ et ΔX. Les formules obtenues font intervenir en numérateurs les mineurs des 4e et 5e termes des 2e et 3e colonnes du déterminant caractéristique $\mathcal{D}(z)$. Ce déterminant lui-même est toujours en dénominateur.

Nous ne donnerons pas le développement de ces expressions, mais nous signalerons une particularité importante qui les distingue des valeurs de ΔX et ΔY obtenues pour les oscillations du couple dans le chapitre précédent.

Alors que pour les oscillations dues aux variations du couple, les rapports $\frac{\Delta X}{\Delta C_m}$, $\frac{\Delta Y}{\Delta C_m}$ aussi bien que $\frac{\Delta\theta}{\Delta C_m}$ tendaient rapidement vers zéro quand la pulsation Ω croissait, à cause de la prépondérance du terme d'inertie du rotor $K\Omega^2$ situé au dénominateur seulement, il n'en est plus de même ici, en ce qui concerne les grandeurs électriques ΔX et ΔY, car les rapports $\frac{\Delta X}{\Delta\chi}$, $\frac{\Delta Y}{\Delta\chi}$ ou $\frac{\Delta X}{\Delta U}$, ... contiennent le terme $K\Omega^2$ aussi bien au numérateur qu'au dénominateur. Seuls les rapports $\frac{\Delta\theta}{\Delta\chi}$ ou $\frac{\Delta\theta}{\Delta U}$, ne contenant ce terme d'inertie qu'au déno-

minateur, décroissent très rapidement, de sorte que l'oscillation du rotor $\Delta\theta$ devient négligeable devant les variations électriques ΔU, $\Delta\chi$, ΔX, ΔY.

On est ainsi conduit à la limite à la notion d'oscillations rapides de tension et de courant, *purement électriques*, c'est-à-dire n'affectant pas pratiquement le mouvement du rotor.

Ces oscillations satisferont aux équations obtenues en faisant dans le système (A), $\Delta\theta = 0$ et en supprimant la première équation. L'équation caractéristique se réduit alors à

$$\mathfrak{M}(z) = \begin{vmatrix} -(s+A)\left(1+\frac{\sigma_1}{\varepsilon_1}z\right) & 0 & \left(1+\frac{1}{\varepsilon_1}z\right) & 0 \\ 0 & -(s+B)\left(1+\frac{\sigma_2}{\varepsilon_2}z\right) & 0 & \left(1+\frac{1}{\varepsilon_2}z\right) \\ r & 0 & z & \omega \\ 0 & r & -\omega & z \end{vmatrix} = 0 \text{ [1]}$$

Equation générale des oscillations lentes. — En réunissant les équations (25) et (36) qui concernent respectivement les oscillations dues aux variations du couple, et celles dues aux variations de tension, il vient pour équation complète des *oscillations forcées lentes :*

$$[-K\Omega^2 + C_s + \mu_0\Omega i]\Delta\theta = \frac{1}{p}\cdot\Delta C_m + [C_s + \mu_0\Omega i]\Delta\chi - [D_s + \mu'_0\Omega i]\frac{\Delta\mu}{U}. \quad (37)$$

Equation qui peut s'écrire :

$$K\frac{d^2}{dt^2}\Delta\theta + \mu_0\frac{d}{dt}(\Delta\theta - \Delta\chi) + C_s(\Delta\theta - \Delta\chi) = \frac{1}{p}\Delta C_m - D_s\frac{\Delta U}{U} - \mu'_0\frac{d}{dt}\frac{\Delta U}{U}. \quad (38)$$

Sous cette forme le groupement des termes en $\Delta\theta$ et $\Delta\chi$ fait apparaître un terme élastique et un terme d'amortissement proportionnels à la variation $\Delta\theta - \Delta\chi = \Delta\Psi$ de l'écart angulaire du rotor par rapport à la tension, tandis que le terme d'inertie reste évidemment fonction de la variation de l'écart absolu $\Delta\theta$.

Les variations de la valeur efficace de la tension interviennent par les deux derniers termes en D_s et μ'_0.

Les coefficients C_s et D_s se calculent comme nous l'avons vu, en pre-

---

(1) On voit facilement que cette équation caractéristique des oscillations purement électriques s'applique non seulement aux petites oscillations, mais encore aux variations d'amplitude quelconque. Elle trouve une de ses applications les plus importantes dans l'étude de l'état variable à la brusque mise en court-circuit d'une machine.

nant les dérivées de l'expression du couple en régime permanent :

$$C_s = \frac{\partial C_0}{\partial \Psi}, \qquad D_s = U \frac{\partial C_0}{\partial U},$$

dont les formules (6), (6 *bis*), (34 *bis*) donnent les expressions développées.

Les coefficients μ_0, μ'_0 sont donnés par les formules (24), (35).

Le système oscillatoire simple correspondant à l'équation (38), aurait pour oscillation propre la solution de l'équation du second degré :

$$Kz^2 + \mu_0 z + C_s = 0 \tag{39}$$

tandis que l'oscillation réelle de la machine synchrone est donnée par l'équation caractéristique $\mathfrak{D}(z) = 0$ qui, en négligeant la résistance de l'induit, et en laissant de côté l'oscillation à haute fréquence de pulsation ω, s'abaisse au 4e degré et s'écrit (formule 19).

$$Kz^2 + C_s + \frac{3U^2}{\omega^2}\left[\frac{\sin^2\Psi}{(S+A)} \cdot \frac{(1-\sigma_1)}{(\varepsilon_1+\sigma_1 z)} + \frac{\cos^2\Psi}{(S+B)} \cdot \frac{(1-\sigma_2)}{(\varepsilon_2+\sigma_2 z)}\right] z = 0 \tag{40}$$

On voit immédiatement en comparant (39) et (40) que si les valeurs z_1', z_2'' des racines de l'équation du second degré (39) sont telles que les expressions :

$$\frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} z', \qquad \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} z'', \qquad \frac{\sigma_2}{\varepsilon_2} z', \qquad \frac{\sigma_2}{\varepsilon_2} z'' \tag{41}$$

soient toutes très petites, ces valeurs z_1', z'' seront très approchées des racines de l'équation exacte (40).

En effet, celle-ci peut s'écrire

$$Kz^2 + C_s + \frac{3U^2}{\omega^2}\left[\frac{\sin^2\Psi}{(S+A)} \cdot \frac{(1-\sigma_1)}{\varepsilon_1}(1-T_1) + \frac{\cos^2\Psi}{(S+B)} \cdot \frac{(1-\sigma_2)}{\varepsilon_2}(1-T_2)\right] z = 0.$$

avec

$$T_1 = \frac{\frac{\sigma_1 z}{\varepsilon_1}}{1+\frac{\sigma_1 z}{\varepsilon_1}} \qquad T_2 = \frac{\frac{\sigma_2 z}{\varepsilon_2}}{1+\frac{\sigma_2 z}{\varepsilon_2}}.$$

Si les rapports $\frac{\sigma_1 z}{\varepsilon_1}$, $\frac{\sigma_2 z}{\varepsilon_2}$, sont tous très petits T_1, et T_2 seront négligeables et cette équation deviendra en première approximation :

$$Kz^2 + C_s + \frac{3U^2}{\omega^2}\left[\frac{\sin^2\Psi}{(S+A)} \frac{(1-\sigma_1)}{\varepsilon_1} + \frac{\cos^2\Psi}{(S+B)} \frac{(1-\sigma_2)}{\varepsilon_2}\right] z = 0.$$

Ce qui n'est autre que l'équation (39).

Donc sous la réserve indiquée, qui exprime que l'oscillation libre est suffisamment lente vis-à-vis des constantes de temps des courants

d'amortissement, on peut employer la formule (38) des oscillations forcées lentes au calcul de l'oscillation propre. Autrement dit la machine synchrone peut être assimilée pour toutes les oscillations dites lentes et dont l'oscillation libre fait alors partie) à un système oscillatoire simple répondant à l'équation du second ordre (38).

Cette simplification souvent valable, permet d'aborder le problème des oscillations d'un groupe de deux ou plusieurs machines de caractéristiques différentes couplées en parallèles.

Chaque machine sera représentée par une équation de la forme (38) dont les termes en $\Delta\chi$ et ΔU permettront de tenir compte des variations de la phase et de la valeur efficace de la tension aux barres communes.

CONTRIBUTION EXPÉRIMENTALE A L'ÉTUDE DE LA CONDUCTIBILITÉ DU SOL [1].

par M. FALLOU.

L'étude des interférences entre lignes à courants forts et lignes à courants faibles a fait, ces dernières années, l'objet d'études théoriques et expérimentales approfondies, et on a établi des formules (Carson-Pollaczek) qui donnent l'inductance propre et la mutuelle inductance des lignes aériennes lorsque le courant alternatif qui circule dans ces lignes revient par le sol.

Les expériences officielles de Münsingen et de Jönköpings, et les essais officieux exécutés en d'autres lieux d'Europe ou d'Amérique, ont permis de vérifier l'exactitude de ces formules, à condition d'attribuer au sol une conductibilité apparente qui varie évidemment avec sa constitution géologique, mais aussi avec la fréquence.

Les formules de Carson-Pollaczek ont donc la sanction d'expériences très complètes, et il est aujourd'hui possible de prédéterminer les paramètres d'un circuit avec retour par le sol, dès que l'on connaît la conductibilité du sol à l'endroit considéré et pour la fréquence des courants en jeu.

Dans la plupart des problèmes qui se posent en pratique, calcul des courants de court-circuit, calcul des tensions induites par ces courants sur des lignes téléphoniques voisines, c'est pour les fréquences industrielles que l'on a besoin d'appliquer ces formules, et c'est donc pour ces fréquences qu'il est le plus utile de connaître la conductibilité du sol.

Or, il nous semble que, pour ces fréquences, la détermination de la conductibilité du sol peut s'effectuer à peu de frais et sans outillage spécial, en mesurant avec une précision suffisante les composantes active et réactive de l'impédance totale du circuit constitué par la ligne d'énergie elle-même, en utilisant le sol comme conducteur de retour. Un voltmètre, un wattmètre et un ampèremètre de précision suffisent le plus souvent pour exécuter ces mesures, quitte à

(1) Communication présentée à la séance du 26 février 1931 de la 4e Section de la Société française des Electriciens.

en rectifier les résultats si cela est nécessaire (lignes longues), en tenant compte des capacités réparties des conducteurs entre eux et par rapport au sol.

Nous avons eu l'occasion d'effectuer de pareilles mesures sur plusieurs lignes de transport d'énergie, et ce sont ces résultats que nous désirons présenter, espérant qu'ils pourront constituer un nouvel apport à la documentation déjà accumulée.

Formules de l'impédance apparente d'une ligne avec retour par le sol

La théorie de Carson conduit aux expressions suivantes pour les constantes linéiques du circuit total constitué par une ligne et le sol :

Résistance linéique

$$R = \rho + \frac{\pi\omega}{2} + \frac{4}{3}\omega h\alpha\sqrt{2}. \tag{1}$$

Inductance linéique

$$L = 1 + \lambda + 2\,\mathrm{Log}_e \frac{2}{\gamma\alpha a} + \frac{4}{3} h\alpha\sqrt{2}. \tag{2}$$

avec

$$\alpha = \sqrt{4\pi\sigma\omega}$$

Dans ces expressions :

$\omega = 2\pi f$ est la pulsation du courant.

ρ la résistance linéique propre du conducteur.

λ l'inductance linéique propre du conducteur.

a le rayon du fil.

σ la conductibilité du sol.

h la hauteur du conducteur au-dessus du sol.

$\gamma = 1{,}781$.

Si le conducteur est parallèle à un autre conducteur situé à la même hauteur h au-dessus du sol, la mutuelle inductance entre les deux circuits a pour expression

$$M = 1 + 2\,\mathrm{Log}_e \frac{2}{\gamma\alpha d} + \frac{4}{3} h\alpha\sqrt{2} - j\left(\frac{\pi}{2} + \frac{4}{3} h\alpha\sqrt{2}\right)$$

d étant la distance qui sépare les deux conducteurs.

Ces formules sont valables pour

$$\alpha\sqrt{4h^2 + a^2} \leqslant 0{,}25$$

c'est-à-dire pour $h \leqslant 19{,}5$ mètres si $d = 8$ mètres $f = 50$ et $\sigma = 10^{-12}$, ou pour $h \leqslant 61{,}6$ mètres, si $d = 8$ mètres $f = 50$ p : s et $\sigma = 10^{-13}$.

1° — Considérons une ligne polyphasée, l'impédance linéique du circuit total constitué par un des conducteurs et le sol, les deux autres phases étant complètement isolées, aura pour expression

$$z = R + jL\omega$$

R et L étant données par les formules (1) et (2). Si l'on mesure les composantes en phase et en quadrature de cette impédance, on pourra tirer de la formule 2 la valeur de α, et par suite de σ.

2° — Considérons la même ligne, mais mettons les trois phases à la terre à l'une de ses extrémités, et alimentons les trois phases en parallèle par l'autre extrémité avec un courant de fréquence f.

Les conducteurs étant régulièrement transposés, on peut considérer qu'ils se trouvent tous les trois à la même hauteur moyenne h au-dessus du sol.

L'impédance linéique du nouveau circuit sera

$$\frac{Z_0}{3} = \frac{1}{3}[R + jL\omega + 2jM\omega] = \frac{1}{3}[R_0 + jL_0\omega]$$

soit en développant

$$\frac{R_0}{3} = \frac{\rho}{3} + \frac{\pi\omega}{2} + \frac{4}{3}\omega h\alpha\sqrt{2} \qquad (4)$$

$$\frac{L_0}{3} = 1 + \frac{\lambda}{3} + 2\log_e\frac{2}{\gamma\alpha\sqrt[3]{ad^2}} + \frac{4}{3}h\alpha\sqrt{2}. \qquad (5)$$

L'inductance $\frac{L_0}{3}$ (égale au tiers de l'inductance homopolaire linéique de la ligne) est donc égale à l'inductance d'une ligne simple placée dans des conditions identiques, mais dont le conducteur aurait un rayon égal à $\sqrt[3]{ad^2}$.

3° On sait enfin que si on alimente la ligne sous une tension triphasée, en mettant les trois phases en court-circuit à l'autre extrémité, on peut mesurer l'inductance triphasée ou directe dont la valeur linéique est donnée par la formule

$$L_d = \lambda + 2\log_e\frac{d}{A}. \qquad (6)$$

Bien entendu, si la ligne est longue, on devra effectuer les corrections nécessaires pour tenir compte des effets de la capacité répartie.

Valeur de σ en fonction de LL_0 *et* L_d.

Ayant mesuré séparément L, L_0 et L_d, on tire facilement les valeurs de σ à partir de l'une des trois relations suivantes calculées pour la fréquence de 50 p : s à partir des égalités (1), (5) et (6).

$$\log_{10}\frac{1}{\sigma} + 51,4h\sqrt{\sigma} = 3,060 + 2\log_{10} d + \frac{L - Ld}{2,3} \quad (A)$$

$$\log_{10}\frac{1}{\sigma} + 51,4h\sqrt{\sigma} = 3,060 + 2\log_{10} d + \frac{L_0 - Ld}{6,9} \quad (B)$$

$$\log_{10}\frac{1}{\sigma} + 51,4h\sqrt{\sigma} = 3,060 + 2\log_{10} d + \frac{L_0 - L}{4,6}. \quad (C)$$

Le second terme du premier membre de ces égalités constitue une correction d'importance relativement faible, mais dont nous avons tenu compte dans les calculs numériques indiqués ci-dessous.

La valeur de σ est ainsi connue par son logarithme. Il s'ensuit évidemment qu'une très faible erreur commise sur la mesure des différents coefficients d'inductance L, conduit à une erreur très importante sur la valeur de σ : une erreur de l'ordre de 1 pour 100 (sur le second membre (mesure de L) conduit à une erreur de l'ordre de 28 pour 100 sur le calcul de σ. Toutes les déterminations effectuées jusqu'à ce jour à partir de la mesure des coefficients de mutuelles inductances, comportent d'ailleurs des erreurs analogues, aussi, est-il à notre avis parfaitement illusoire de donner des valeurs de σ avec deux et même trois chiffres caractéristiques. Pour les besoins de la pratique, ces erreurs sont d'ailleurs de faible importance, puisque σ intervient dans les diverses formules, soit par son logarithme, soit par des fonctions analogues.

DÉTERMINATION EXPÉRIMENTALE DE σ POUR QUELQUES LIGNES DE TRANSPORT D'ÉNERGIE

Nous pouvons fournir des résultats de mesures effectuées sur cinq lignes de transport d'énergie situées en des régions assez différentes du territoire français :

1° Ligne à 60 kV de 26 km, de longueur en câbles de cuivre située dans la banlieue sud de Paris. Cette ligne surplombe les plateaux tertiaires de la rive gauche et de la rive droite de la Seine. Elle ne comporte aucun fil de terre.

Valeurs mesurées :

$L_0 = 43,6$ cgs.

$L_d = 13,1$ »

$L = 23,1$ »

Valeur de σ calculée d'après la formule
- A......... $4,4 \cdot 10^{-13}$ cgs.
- B......... 3,7 —
- C......... 3,4 —

soit $4 \cdot 10^{-13}$ cgs.

2° Ligne à 220 de kV 112,2 km de longueur en câble d'aluminium-acier, située entre Paris et Orléans, et surplombant les terrains tertiaires de la région parisienne et de la Beauce. Cette ligne est munie d'un câble de terre de 60 mm² en acier.

Valeurs mesurées :

$$L_0 = 39{,}0 \text{ cgs.}$$
$$L_d = 13{,}47 \text{ »}$$
$$L = 22{,}25 \text{ »}$$

Valeur de σ calculée d'après la formule { A......... 2,5 10^{-13} cgs. B......... 3,2 — C......... 3,8 —

soit 3.10^{-13} cgs.

3° Ligne à 220 kV de 168 km de longueur en câble d'aluminium-acier, située entre Orléans et Eguzon, et munie de 2 câbles de terre en acier, de 60 mm². Cette ligne surplombe : *a*) sur la première moitié de son parcours des terrains sédimentaires et les marais de la Sologne ; *b*) sur la seconde moitié des calcaires jurassiques.

Valeurs mesurées :

$$L_0 = 35{,}3 \text{ cgs.}$$
$$L_d = 13{,}1 \text{ »}$$
$$L = 20{,}4 \text{ »}$$

Valeur de σ calculée d'après la formule { A........ 11,8 10^{-13} cgs. B........ 10,8 — C........ 10,1 —

soit 11.10^{-13} cgs.

4° Ligne à 90 kV de 55,8 km en câble d'aluminium-acier, située entre Marèges et La Mativie (Corrèze), et munie d'un câble de terre en acier de 50 mm². Les terrains surplombés par cette ligne sont constitués mi partie par les micaschises et mi-partie par des granits.

Valeurs des inductances linéiques :

$$L_0 = 41{,}4 \text{ cgs.}$$
$$L_d = 12{,}99 \text{ »}$$
$$L = 23{,}3 \text{ »}$$

Valeur de σ calculée d'après la formule { A..... 1,07 10^{-13} cgs. B..... 1 — C..... 0,9 —

soit 1.10^{-13} cgs.

5° Ligne à 120 kV de 65 km de longueur, en câble d'aluminium acier, située entre Jeanne-Rose (Saône-et-Loire) et Sombernon (Côte-d'Or)

munie d'un câble de terre en acier de 50 mm². Cette ligne surplombe des calcaires jurassiques (1).

Valeurs mesurées.

$L_0 = 41,10$.

$L_d = 14,55$.

Valeur de σ calculée d'après la formule B : 4.10^{-13} cgs.

Remarques. — I. — Les divergences entre les résultats obtenus pour σ à partir des formules A, B et C sont relativement faibles si l'on tient compte de ce qu'une erreur de l'ordre de 1 pour cent sur la mesure de L entraîne sensiblement comme nous l'avons déjà indiqué, une erreur de 28 pour cent sur le calcul de σ.

II. — Il apparaît que les conditions réalisées par la ligne n° 4 soient parmi les plus défavorables que l'on puisse rencontrer en France, et par conséquent, que la valeur $\sigma = 10^{-13}$. doive constituer un minimum sur notre territoire.

Au contraire, la valeur $\sigma = 10^{-12}$ généralement considérée comme un maximum, se rencontre dans le cas particulier de la ligne n° 3, qui surplombe en grande partie un terrain marécageux.

III. — Il est indispensable de souligner que toutes les lignes, hormis la ligne n° 1, sont munies d'un ou de deux fils de terre *en acier*. Etant donnée la résistance apparente et l'inductance interne très élevées que possèdent ces fils de terre pour les courants de 50 p : s, il est peu probable qu'ils soient parcourus par une fraction importante du courant de retour, et leur effet doit être négligeable. Ce point nous paraît néanmoins un de ceux qu'il serait indispensable de vérifier. L'effet des fils de garde serait certainement très important et les formules dérivées de la théorie de Carson cesseraient d'être valables si ces fils étaient en cuivre ou en aluminium.

---

(1) Les documents relatifs à cette ligne nous ont été obligeamment communiqués par M. BARRÈRE.

OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ

Production

Le problème des balais dans la construction des machines électriques. Docteur W. Heinrich, Ingénieur en Chef de la « Carbone A. G » Berlin Traduit de l'allemand par J Legueu, Directeur adjoint de la Société « Le Carbone » à Gennevilliers. Un volume broché, 25 × 16 cm , 240 pages, 136 figures. Edité par Dunod, 92, rue Bonaparte, Paris, 1931. Prix : 64 francs. — *Don de l'Editeur.*

Appareillage

Communication Networks. Volume I. *The Classical Theory of Lumped Constant Networks.* Ernest A. Guillemin, Professeur Assistant de l'Electrical Engineering Massachusetts Institute of Technology. Un volume relié, 25 × 15 cm., 425 pages, 144 figures. Edité par John Wiley and Sons, Inc. New-York, 1931. Prix : 25 sch. — *Don de l'Editeur.*

Télégraphie. — Téléphonie

Comment supprimer les parasites et les brouillages en T S.F. Michel Adam, Ingénieur E S.E. Un volume broché, 18 × 14 cm., 94 pages, 42 figures. Edité par Radio Magazine, 61, rue Beaubourg, Paris, 1931. — *Don de l'Editeur.*

Recherches

L'électro-acoustique. Rapport de l'acoustique moderne et de l'Electricité. Conférence faite au Conservatoire National des Arts et Métiers le 9 mai 1931. Pierre David, Docteur ès-Sciences, Ingénieur au Laboratoire National de Radio-Electricité. Un volume relié, 24 × 17 cm , 39 pages, 19 figures. Edité par la Librairie Hermann et Cie., 6, rue de la Sorbonne, Paris, 1931. — *Don de l Editeur.*

Enseignement

Cours élémentaire de télégraphie et téléphonie sans fil. F. Bedeau, Docteur ès Sciences, Agrégé de Physique. Préface de M. le Général Ferrié. Un volume broché, 25 × 16 cm , 415 pages, 330 figures. Edité par la Librairie Vuibert, boulevard Saint-Germain, Paris, 1931. — *Don de l'Editeur.*

Electric circuit Analysis. Michel G. Malti. Ph. D., Professeur Assistant à l'Electrical Engeneering Massachusettis Institute of Technology. Un volume relié, 23 × 15 cm., 389 pages. figures et tableaux. Edité par John Wiley and Sons, Inc. New-York, 1931. Prix : 22 /6 net. — *Don de l'Editeur.*

Machines électriques. (Electrotechnique appliquée) Tome I : *Dynamos, alternateurs, transformateurs statiques.* Tome II : *Moteurs d'induction, machines synchrones, commutatrices, moteurs alternatifs à collecteurs, redresseurs.* A. MAUDUIT, Professeur à la Faculté des Sciences de Nancy, Directeur de l'Institut Electrotechnique et de Mécanique appliquée, Lauréat de l'Académie des Sciences et de la Fondation Montéfiore. Préface de Blondel. Deux volumes brochés, 25 × 16 cm : Tome I : 895 pages, 387 figures. Tome II : 843 pages, 264 figures. Edité par Dunod, 92, rue Bonaparte Paris, 1931.

Guido Semenza. In Memoriam. Société Italienne des Electriciens. Un volume relié, 27 × 20 cm., 38 pages Edité par la Société Italienne des Electriciens. Milano, 1931. — *Don de l'Editeur.*

BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS

Production

Le problème des balais dans la construction des machines électriques, par D. Ing. W. Heinrich, Ingénieur en chef de la « Carbone AG », Berlin-Francfort-sur-Moselle. Traduit de l'allemand par J. Legueu, directeur adjoint de la Société « Le Carbone » à Gennevilliers, Editeur Dunod, 92, rue Bonaparte, Paris (VI[e]) Edition 1931. Un volume broché 17 × 25 cm. 236 pages, 94 schémas, 20 photogravures.

Cet ouvrage, qui se signale par la clarté de sa rédaction et l'abondance de sa documentation comprend 2 parties :

Dans la première, réservée à l'étude mécanique du problème des balais, l'auteur examine successivement la construction des collecteurs et des bagues, la constitution des balais, leurs montures et les divers types de porte-balais. Il étudie ensuite les conditions de fonctionnement des balais et les phénomènes qui accompagent ce fonctionnement (frottement, vibrations, échauffement, etc...).

Dans la deuxième partie, consacrée à l'étude électrique du problème des balais, l'auteur examine, plus particulièrement, les phénomènes électro-physiques et chimiques entre balais et bagues, ainsi que les chutes de potentiel sous les balais dans les machines à courant continu. Il étudie, en outre, l'influence des divers types d'enroulements sur le fonctionnement des balais et la commutation. Les derniers chapitres sont enfin consacrés à l'étude de la captation d'intensités élevés sur les collecteurs et au fonctionnement des balais et bagues en courant continu et alternatif.

Les chaudières à vapeur, par Ch. de Bié, Ingénieur à la Société de Chaudronnerie et constructions mécaniques Scheidecker frères et Cie, 2[e] édition. Un volume 16 × 25 cm., 600 pages, 490 figures, broché : 165 francs. Edité par la Librairie Dunod, 92, rue Bonaparte, Paris, 5[e]. — *Hommage de l'éditeur.*

Cet ouvrage est appelé à rendre de grands services à tous ceux qui construisent ou utilisent des chaudières à vapeur. Il contient tout ce qui peut être utile dans cette matière, depuis les règlements d'administration publique, jusqu'aux modes de calcul des éléments constitutifs des divers types de chaudières.

Après un exposé des méthodes servant à la détermination des pouvoirs calorifiques, l'auteur décrit successivement les divers types de chaudières en usage ainsi que les appareils annexes. Il indique ensuite les renseignements nécessaires à la construction des chaudières : choix des matériaux, leur réception, les règles de construction, les essais, etc.. En outre cet ouvrage contient une documentation sur l'épuration des eaux et sur les divers appareils en usage à cet effet. Il contient, en outre, un grand nombre de tableaux et graphiques qui en font un aide-mémoire des plus précieux.

Appareillage

Communication Networks (vol. I), par Ernest A. Guillemin, Ph. D. Assistant Professor of. Electrical Engineering Massachusetts Institute of Technology. Un volume relié 22 × 15 cm. de 422 pages, 145 figures. Editeurs : John Wiley and Sons, Inc, New York. Chapman and Hall, Limited. London, 11 Henrietta Street Covent Garden, WC 2. (Edition 1931). — Prix 25.

Cet ouvrage constitue une étude intéressante du régime transitoire et du régime

stationnaire, dans les circuits comprenant self, capacité et résistance et constituant des réseaux maillés.

La difficulté de l'étude est d'ailleurs progressivement graduée depuis le cas le plus simple du circuit élémentaire et du réseau à une seule maille jusqu'aux cas les plus complexes. La détermination des constantes d'intégration font en particulier l'objet de longs développements.

L'auteur s'est particulièrement attaché dans cet ouvrage à atténuer le caractère nécessairement mathématique des solutions par des analogies mécaniques et par l'interprétation physique des résultats.

The Jet-wave rectifier ; an account of its constructional development during the years 1919-1929, par Jul. Hartmann. Un volume de 300 pages, de 26 × 18 cm avec figures, courbes et reproductions photographiques, 1931. Danmarks Naturvidenskabelige Samfund, Kopenhague.

Il s'agit de redresseurs de courant utilisant les ondulations dans un plan vertical, d'un jet de mercure soumis à l'action d'un champ magnétique périodique.

L'auteur expose les principes généraux d'après lesquels sont établis ces redresseurs, puis étudie en détail et sous une forme très scientifique, les conditions d'établissement des éléments constitutifs de ces appareils : production, écoulement et ondulations du jet de mercure en utilisant les théories de l'écoulement des fluides. Etude du système producteur du champ magnétique et son calcul, étude des électrodes principales et auxiliaires et enfin de l'appareil complet.

Tous les détails concernant les calculs d'établissement, la construction et le fonctionnement de ces redresseurs sont exposés avec le plus grand soin. De nombreux relevés expérimentaux des photographies particulièrement intéressantes d'appareils ou de parties d'appareils en service, illustrent et complètent cet exposé.

Recherches

L'ancienne et la nouvelle théorie des quanta, par Eugène Bloch, professeur de physique théorique et de physique céleste à la Sorbonne. Un volume de 17 × 25 cm., et de 417 pages, 1930. Librairie Scientifique Hermann, 6, rue de la Sorbonne. Paris, Editeur.

« Le but poursuivi, dit l'auteur, a été simplement de donner aux étudiants une notion précise du développement historique de la théorie des quanta depuis les origines jusqu'à l'époque actuelle, en illustrant le développement progressif des idées par un certain nombre d'exemples choisis parmi les plus typiques. Nous considérerons ce but comme pleinement atteint si nous avons réussi à inspirer à quelques-uns d'entre eux le désir de poursuivre l'étude de questions passionnantes, dont un grand nombre sont encore en pleine évolution ».

Nous pensons, pour notre part, que l'auteur a parfaitement réussi, et nous envions les étudiants qui bénéficient de pareils cours, professés avec une aussi parfaite maîtrise.

Comme la théorie des quanta elle-même, l'ouvrage débute par l'exposé de la théorie du rayonnement de Planck ; il étudie ensuite les phénomènes qui ont conduit à la conception des « atomes » de lumière ; l'effet photoélectrique, l'effet Compton.

Les applications sont ensuite étudiées ; structure de l'atome, théorie de Bohr, conditions de Sommerfeld, magnétisme atomique, séries de raies spectrales, phénomène de Zeeman.

Abordant maintenant la question d'un point de vue plus élevé, l'ouvrage, après un rappel des principes généraux de la mécanique, expose, en particulier d'après Bohr et Sommerfeld, les idées et les conséquences essentielles de la théorie.

Tout ceci est ce qu'on appelle l'ancienne théorie, sous la forme que lui ont donnée les deux savants dont nous venons de rappeler les noms. Les chapitres suivants étudient la nouvelle physique, issue des travaux de Louis de Broglie. Celui-ci eut, en 1924, l'idée d'associer des ondes au mouvement d'un point matériel, idée féconde

à laquelle l'expérience donna une magnifique consécration, en mettant en évidence la nature ondulatoire de l'électron. De ces idées, Schrödinger tira toute une mécanique nouvelle, la mécanique ondulatoire.

En même temps s'était développée, à la suite des travaux de Heisenberg, la mécanique des matrices. D'abord complètement distincte des travaux précédents, elle y fut ramenée par Schrödinger, qui montra l'équivalence des deux théories.

Encore en plein développement, les nouvelles mécaniques ont conduit déjà à un grand nombre de résultats intéressants. Elles ont coordonné des phénomènes qui s'opposaient jusqu'alors, étant expliqués les uns par des théories ondulatoires, les autres par des théories corpusculaires.

Elle est en passe d'aboutir à des conséquences beaucoup plus importantes encore. Heisenberg, en substituant au principe de causalité le principe d'indétermination, appuie la physique tout entière sur de nouvelles bases.

L'ouvrage se termine par quelques pages sur les mécaniques statistiques nouvelles, où se trouvent exposées les idées essentielles.

On voit combien est riche la substance de ce livre. Il donne au lecteur non spécialisé, qui serait vite débordé par la marée montante des innombrables mémoires traitant des mêmes questions, la possibilité de se faire une idée d'ensemble des conceptions de la physique moderne; il est le meilleur point de départ pour l'étudiant qui désire les connaître, en vue de recherches ultérieures.

Propagation d'une onde sonore dans l'atmosphère et théorie des zones de silence, par Henri Galbrun, Docteur ès sciences. Un volume 15 × 25 cm, 350 pages, Gauthier-Villars et Cie, éditeurs, 55, quai des Grands-Augustins, Paris.

L'auteur étudie dans cet ouvrage les conditions dans lesquelles se propagent les ondes sonores émises en un point, dans l'atmosphère supposée exempte d'obstacles accidentels, c'est-à-dire sans nuages ni mouvements de terrain, en un mot sans parois réfléchissantes. Par contre toute la théorie repose sur l'existence de couches d'air de densités constamment variables, le défaut d'homogénéité de ce milieu créant des perturbations dans la propagation des ondes, qui ne s'effectuent pas suivant des trajectoires rectilignes ; il explique ainsi la formation des zones de silence. Les théories exposées sont très fouillées et tous les calculs y sont soigneusement détaillés en remontant fréquemment aux principes de sorte que la compréhension et la discussion de ces théories sont rendues très faciles.

Mécanique

Les mouvements mécaniques, par Marcel Nicaise, Professeur à l'école des Mines de Mons, Directeur de la Cie continentale pour la fabrication des compteurs. Un volume in 8°, 694 pages, 1030 figures. Prix relié : 200 francs. Librairie Polytechnique, Ch. Béranger, 15, rue des Saints-Pères, Paris.

Cet ouvrage est appelé à rendre d'importants services à tous ceux qui ont à construire des organismes mécaniques de n'importe quel type. Il contient la description de tous les mécanismes connus à ce jour : bielles, transmissions, cames, engrenages, poulies, encliquetages, etc... Chaque description comporte une partie théorique permettant de calculer notamment les vitesses relatives des divers organes et une partie pratique donnant les détails essentiels de construction. L'ouvrage est très clairement établi dans toutes ses parties et la connaissance des matières qu'il contient permettra de choisir pour chaque problème la solution la plus heureuse. Il peut être lu sans connaissances théoriques spéciales.

Congrès

XIIe Congrès International de Tramways, de chemins de fer d'intérêt local et de transports publics automobiles, Varsovie 29 juin, 6 juillet 1930.

Comptes rendus détaillés. Un volume, 752 pages, nombreuses illustrations dans le texte et hors texte, Schémas plans et cartes hors texte. Secrétariat général de l'Union, 112, rue du Trône, Bruxelles.

Cet ouvrage comporte le compte rendu des séances du Congrès et des discussions soulevées par les communications des rapporteurs. Le texte de ces communications est donné en annexe.

L'ouvrage traite, dans l'ensemble, de transports urbains. La plupart des rapporteurs ont étudié particulièrement les aménagements intérieurs des voitures pour faciliter le mouvement des voyageurs, la perception, le contrôle. Les représentants de la T. C. R. P., en particulier, ont exposé le mode de perception par carnets de tickets et oblitérateurs enregistreurs et le résultat de leurs essais actuels de « one man car » sur certaines sections d'autobus.

La partie purement technique est traitée dans des rapports très documentés sur les « dispositifs d'alimentation en énergie d'un réseau de tramways électriques » sur les « différents systèmes de transformation de courant alternatif haute tension en courant continu utilisable pour la traction » etc...

MANUELS

Handbuch der Experimental physik. — Geophysik. — Physik der Feste Erdkörpers und des Meeres, par G. ANGENHEISTER, tome II. Un volume relié de 18 × 31 cm, 823 pages, 313 illustrations et 3 cartes, édité par l'Akademische, Verlagsgesellschaft, Leipsig, 1923.

Ce livre qui fait partie de la collection éditée sous le titre « Handbuch der Experimental physik » (Manuel de physique expérimentale) constitue le tome II de la Géophysique, il est intitulé Physique des continents et des mers.

Il est divisé en deux parties : Physique des continents, Physique des mers.

Les points traités dans la première partie sont les suivants :

Modification des combinaisons chimiques dans le sol — Radioactivité du sol — La Figure de la terre et ses modifications — Forme et masse de la terre, répartition des masses — Séismologie et théorie des tremblements de terre.

Dans la seconde partie sont étudiées successivement l'étendue et la profondeur des mers, les propretés physico-chimiques de l'eau de mer, la température des mers, la teneur en sel de l'eau de mer, la statique et la cinématique des mers, la dynamique des courants marins ; le volume se termine par des considérations sur les mouvements de la mer et en particulier sur les marées considérées du point de vue de l'hydrodynamique.

ENSEIGNEMENT ET DIVERS

Electric circuit analysis, par Michel G. MALTI, PH. D. professeur adjoint d'électrotechnique à l'Université de Cornell (Etats-Unis). Un volume de 23 × 15 cm de 389 pages avec de nombreuses figures, planches hors texte et tables numériques, 1930 Editeurs : New-York : John Wiley and sons ; Londres : Chapman et Hall. 11 Henrietta Street, W. C. 2. Prix anglais 22/6. — *Don de MM. Chapman et Hall.*

Cet ouvrage, consacré à l'étude détaillée des circuits électriques s'adresse au lecteur qui aborde pour la première fois cet important problème. L'auteur rappelle tout d'abord les connaissances mathématiques nécessaires à la compréhension du sujet comme les propriétés des quantités imaginaires, des vecteurs et des fonctions circulaires. Après un exposé sur les formules de dimensions, il entreprend l'étude purement électrique des circuits en considérant en premier lieu ceux à constantes électriques concentrées, d'abord constantes, puis variables. Il envisage les différentes combinaisons de circuits qui peuvent se présenter en pratique, étudie d'une façon détaillée les formes de la puissance réelle et de la puissance réactive dans ces

circuits, puis après un exposé très intéressant et très complet de la théorie de Fourier et des fonctions non sinusoïdales, étudie les circuits polyphasés équilibrés ou non.

Après avoir examiné les différents phénomènes transitoires, l'auteur termine par l'étude des circuits à caractéristiques uniformément réparties.

Des appendices sur la démonstration de divers théorèmes utilisés dans l'ouvrage et des tables numériques très utiles pour les calculs de lignes, complètent cet exposé.

L'ouvrage, d'un caractère très personnel, écrit dans un but didactique, rendra de grands services aux ingénieurs qui veulent aborder le calcul des réseaux de transmission.

The Autobiography of an Engineer, par Willam Le Roy Emmet. Un volume, 13 × 21 cm., 220 pages, relié Fort Orange Press Albany New-York, éditeurs.

M. Emmet est un Ingénieur américain célèbre dans le monde des Industries mécaniques et électriques. Il a eu un rôle de premier plan dans les quatre importantes phases du développement de l'industrie électrique, indiqués ci-après : appareils et méthodes de distributions d'électricité — turbines à vapeur et alternateurs — propulsion électrique des navires-machines thermiques à vapeur de mercure.

Ce livre est l'autobiographie de cet Ingénieur. On y trouve à chaque page la marque de son indomptable énergie, de sa claire intelligence et de son sens pratique des affaires. Mais on y trouve aussi la preuve que ce technicien était un grand amoureux de la nature, un grand citoyen et un esprit des plus éclectiques.

En dehors de l'intérêt que présente la connaissance des principales circonstances de la vie d'un homme de cette envergure, on trouve dans ce livre des renseignements fort intéressants sur les questions techniques qu'il a étudiées.

IL Y A TRENTE ANS

Réunion ordinaire mensuelle du 3 juillet 1901

Présidence de M. A. HILLAIRET.

M. P. JANET est désigné pour représenter officiellement la Société au *Meeting de Buffalo*.

M. J BLONDIN présente une communication sur les *transformateurs électrolytiques de courants alternatifs en courants continus (système Pollak)*.

Après l'historique très documentée des soupapes électrolytiques depuis Buff (1857) et Ducretet (1875), M. BLONDIN indique les montages employés avec 2 et 4 soupapes ; il décrit les soupapes Pollak à lames d'aluminium et de plomb plongées dans une solution légèrement acide de phosphate de potassium, fonctionnant à une tension qui peut atteindre 140 V et même 200 V avec un rendement de 75 pour 100.

M. HOSPITALIER fait une communication *sur quelques applications de la méthode stroboscopique à l'étude des courants alternatifs*, et présente *l'arcoscope et l'ondographe*.

L'arcoscope est fondé sur la méthode stroboscopique et permet l'examen des variations d'éclat d'un arc à courant alternatif.

L'ondographe, réalisé après l'oscillographe Blondel et le rhéographe Abraham, présente un remarquable caractère de simplicité.

M. F. LAPORTE expose les *résultats de quelques expériences photométriques sur la lampe Bremer*, exécutées au Laboratoire Central d'Électricité.

M. P. JANET fait une communication *sur l'arc électrique employé comme récepteur téléphonique et comme transmetteur*.

La conférence est illustrée par une expérience de l'arc chantant réalisée par MM. LAPORTE et LÉONARD.

BAR-LE-DUC. — IMP. COMTE-JACQUET *Le gérant :* Alfred MAGNIER.

5e série, tome I, no 8. Août 1931

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS

SOMMAIRE

COMMUNICATIONS TECHNIQUES ET DISCUSSIONS (1) :

Calcul et détermination des chutes de tension des transformateurs à trois enroulements (M. P. BUNET), p. 770. — Sur la définition, la signification physique et l'emploi en électrotechnique des diverses inductances relatives à deux enroulements (M. A. MAUDUIT), p. 784. — Discussions sur la communication de M. MAUDUIT (M. DARRIEUS), p. 798. — Observations de M. BUNET sur la communication de M. MAUDUIT, p. 799. — Observations de M LIÉNARD sur la communication de M. MAUDUIT, p. 807. — La soudure électrique (M. M. MATHIEU), p. 810. — Machines à souder et applications (M. NEUMAYER), p. 846. — Les sources d'alimentation de l'arc pour la soudure électrique avec baguette d'apport, et plus particulièrement, les génératrices dites de soudure à courant continu (M. J. BERGER), p. 856. — Postes de comptage pour installations triphasées à neutre accessible (M. MAILLAT), p. 879.

---

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

CALCUL ET DÉTERMINATION DES CHUTES DE TENSION DES TRANSFORMATEURS A TROIS ENROULEMENTS (1)

par M. P. Bunet.

Les transformateurs à trois enroulements connectés à des circuits indépendants font l'objet d'applications dont le nombre tend à se développer. Dans le cas d'un seul enroulement inducteur, la variation de tension d'un des enroulements induits ne dépend pas seulement de la charge correspondant au circuit qui lui est relié, mais encore de la charge de l'autre enroulement induit. Un certain nombre de publications ont déjà paru au sujet de la détermination de ces variations de tension. Beaucoup sont inapplicables en pratique.

Dans ce qui suit, on a mis nettement de côté toutes considérations purement théoriques, on a évité de se servir de coefficients d'induction affectés par la saturation, et on est resté simplement sur des modes opératoires correspondant aux désirs exprimés à l'auteur par des ingénieurs effectuant des calculs de transformateurs ou procédant à des essais de vérification et réception de ces appareils.

Le calcul et la détermination des chutes de tension des transformateurs à trois enroulements a déjà fait l'objet de publications. Plusieurs formules ont été données, ne conduisant d'ailleurs pas aux mêmes résultats. En général, elles ne répondent pas aux désirs des constructeurs ni à ceux des exploitants, surtout quand elles laissent les déterminations reposer sur la connaissance des coefficients totaux L_1L_2M, ou quand elles supposent les inductances de dispersion totale divisées en portions attribuées à chacun des enroulements.

La présente note est ainsi une suite des travaux de la première section sur les coefficients d'induction des machines.

Transformateurs a deux enroulements. — On sait calculer l'inductance totale de dispersion par des formules classiques. Cette valeur calculée est très voisine de celle que l'on mesure par l'essai de court-circuit l. Cet essai donne aussi une valeur r de la résistance globale totale effective.

En partant de l calculé ou mesuré, on obtient la chute de tension

(1) Ce rapport présenté à la Séance du 17 juin de la 1re Section, sera discuté à la Semaine de Discussions de novembre 1931.

secondaire, en première approximation par

$$rI_2 \cos \varphi_2 + l\omega I_2 \sin \varphi_2.$$

En seconde approximation on ajoute

$$\frac{1}{2U}(l\omega I_2 \cos \varphi_2 - rI_2 \sin \varphi_2)^2.$$

Le cas le plus fréquent de transformateurs à colonnes et deux cylindres concentriques conduit à la figure 1

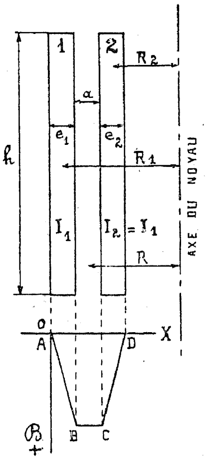


Figure 1. — Dispersion d'un transformateur à deux enroulements.

et à la formule

$$l = 2\pi R \frac{4\pi}{10} \frac{n^2}{h} \left[\frac{e_1}{3} + a + \frac{e_2}{3}\right]$$

avec addition de 10^{-8} quand I est en ampères et l en henrys.

Les dispositions particulières amènent quelquefois à majorer un peu h, hauteur commune des deux enroulements.

Les autres formes de transformateurs donnent lieu à des figures et formules analogues.

Transformateurs a trois enroulements. — En désignant par 1 le primaire ou inducteur, par 2 et 3 les circuits induits indépendants l'un de l'autre, ou secondaire et tertiaire, la disposition à colonnes concentriques donne lieu, en classant les enroulements par leurs diamètres croissants, aux combinaisons

1, 2, 3 — 1, 3, 2 — 2, 3, 1 — 3, 2, 1 — 2, 1, 3 — 3, 1, 2

Ces six combinaisons se ramènent à 2 seulement car le changement de 2 en 3 n'est qu'une question d'indices, et il importe seulement que le primaire soit ou non entre le secondaire et le tertiaire. Nous étu-

dierons donc une première forme 3, 2, 1 et une seconde forme 3, 1, 2.

Nous appellerons I_1 le courant primaire, I_2 et I_3 les courants secondaire et tertiaire. Si ces deux derniers circuits sont fermés sur des résistances, les trois courants seront supposés positifs; de même, s'ils sont fermés sur des inductances. Si 2 est fermé sur une capacité et 3 sur une inductance, I_3 sera positif et I_2 négatif, I_1 étant de l'un ou l'autre signe.

Nous supposerons les trois courants de même phase, sauf le signe

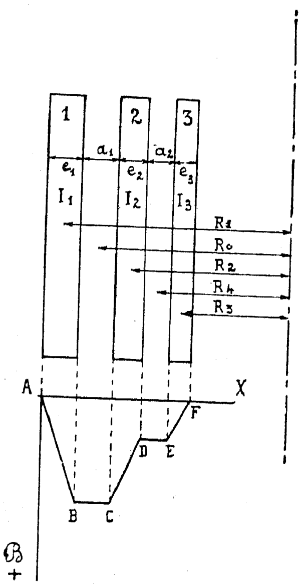


Figure 2. — Dispersion d'un transformateur à trois enroulements; première forme.

ou 180°. Cela nous oblige à décomposer les trois courants totaux selon deux axes rectangulaires et à effectuer successivement nos opérations sur les deux composantes. Pour chaque système nous aurons $I_1 = I_2 + I_3$ (ramenés au même nombre de spires n).

Première forme. — Les enroulements sont disposés comme sur la figure 2 qui donne les valeurs de $\mathcal{B}$ créant le flux de dispersion. Si I_2 ou I_3 sont négatifs, la position du point D change, en s'éloignant de l'axe des X plus que le point C ou bien en passant de l'autre côté de l'axe des X.

a) *Dispersion de 1 à 2.* — Le flux dans la bobine 1 est :

1° portion AB ; on a immédiatement le flux partiel

$$2\pi R_1 \frac{4\pi}{10} \frac{n^2}{h} I_1 \frac{e_1}{3};$$

2° portion BC ; on a de même

$$2\pi R_0 \frac{4\pi}{10} \frac{n^2}{h} I_1 a_1 ;$$

3° portion CD ; la valeur de $\mathcal{B}$, x se comptant depuis le point C, est

$$\frac{4\pi}{10} \frac{n}{h} \left(I_1 - \frac{I_2}{e_2} x \right);$$

agissant sur n spires. Le flux partiel est ainsi

$$2\pi R_2 \frac{4\pi}{10} I_1 \left[e_2 - \frac{I_2}{I_1} \frac{e_2}{2} \right].$$

Le flux dans la bobine 2 est :

4° portion CD avec le même $\mathcal{B}$ que ci-dessus embrassant $\frac{nx}{e_2}$ spires ce qui, par intégration, donne pour flux partiel

$$2\pi R_2 \frac{4\pi}{10} \frac{n^2}{h} I_1 \left[\frac{I_2}{I_1} \frac{e_2}{3} - \frac{e_2}{2} \right]$$

en tenant compte de l'inversion de sens d'enroulement.

5° portions DEF. — Elles agissent de façons opposées sur les deux enroulements 1 et 2.

Au total, en appelant $R_{m1.2}$ un rayon moyen relatif aux bobines 1 et 2 (ou le quotient du périmètre par 2π si les bobines ne sont pas circulaires), l'inductance totale de dispersion de 1 à 2 sera

$$\lambda_{1.2} = 2\pi R_{m1.2} \frac{4\pi}{10} \frac{n^2}{h} \left[\frac{e_1}{3} + a_1 + \frac{e_2}{2} - \frac{I_2}{I_1} \frac{e_2}{6} \right]$$

en faisant la convention que les $\lambda\omega$ doivent se multiplier simplement par I_1 pour donner les tensions, avec 10^{-8} en volts, et courants en ampères.

D'autre part, le calcul ou l'essai de court-circuit nous indiqueraient pour les circuits 1 et 2 seuls, une inductance de dispersion totale (1)

$$l_{1.2} = 2\pi R_{m1.2} \frac{4\pi}{10} \frac{n^2}{h} \left[\frac{e_1}{3} + a_1 + \frac{e_2}{3} \right].$$

De sorte que, dans le cas où un courant I_3 est introduit dans le troisième enroulement, tel que $I_3 = I_1 - I_2$, la dispersion entre 1 et 2 est caractérisée par

(1) En toute rigueur on pourrait prendre des rayons moyens un peu différents dans les deux cas. Nous ne le ferons pas pour simplifier.

$$\lambda_{1.2} = l_2\left(1 + \frac{I_3}{I_1}\,\frac{e_2}{2e_1 + 6a_1 + 2e_2}\right).$$

b) *Dispersion de 2 à 3.* — Le flux dans la bobine 1 est 1°, 2°, 3 comme ci-dessus, puis :

4° portion DE ; on a le flux partiel

$$2\pi R_4\,\frac{4\pi}{10}\,\frac{n^2}{h}\,I_3 a_2 = 2\pi R_4\,\frac{4\pi}{10}\,\frac{n^2}{h}\,I_1\left[a_2 - \frac{I_2}{I_1}\,a_2\right].$$

5° portion EF ; on a de même

$$2\pi R_4\,\frac{4\pi}{10}\,\frac{n^2}{h}\,I_3\,\frac{e_3}{2} = 2\pi R_4\,\frac{4\pi}{10}\,\frac{n^2}{h}\,I_1\left[\frac{e_3}{2} - \frac{I_2}{I_1}\,\frac{e_3}{2}\right].$$

Le flux dans la bobine 3 est :

6° portion EF ; la valeur de $\mathcal{B}$ est

$$\frac{4\pi}{10}\,\frac{n}{h}\,I_3\left(1 - \frac{x}{e_3}\right)$$

agissant sur $\frac{nx}{e_3}$ spires, ce qui par intégration donne le flux partiel.

$$-2\pi R_3\,\frac{4\pi}{10}\,\frac{n^2}{h}\,I_3\,\frac{e_3}{6} = -2\pi R_3\,\frac{4\pi}{10}\,\frac{n^2}{h}\,I_1\left[\frac{e_3}{6} - \frac{I_2}{I_1}\,\frac{e_3}{6}\right].$$

Au total, en appelant $R_{m1.2.3}$ le rayon moyen relatif aux bobines 1, 2, 3 nous aurons une inductance totale de dispersion de 1 à 3 de forme

$$\lambda_{1.3} = 2\pi R_{m1.2.3}\,\frac{4\pi}{10}\,\frac{n^2}{h}\left[\frac{e_1}{3} + a_1 + e_2 + a_2 + \frac{e_3}{3} - \frac{I_2}{I_1}\left(a_2 + \frac{e_2}{2} + \frac{e_3}{3}\right)\right]$$

toujours avec la convention de multiplier simplement les $\lambda\omega$ par I_1 pour obtenir les tensions.

D'autre part, en considérant 1 et 3 seuls on a

$$l_{1.3} = 2\pi R_{m.1.2.3}\,\frac{4\pi}{10}\,\frac{n^2}{h}\left[\frac{e_1}{3} + a_1 + e_2 + a_2 + \frac{e_3}{3}\right]$$

d'où :

$$\lambda_{1.3} = l_{1.3}\left[1 - \frac{I_2}{I_1}\,\frac{6a_2 + 3e_2 + 2e_3}{2e_1 + 6a_1 + 6e_2 + 6a_2 + 2e_3}\right].$$

Deuxième forme. — La disposition est celle de la figure 3. Les mêmes remarques sont à faire au sujet de la position des points D et E par rapport à l'axe des X.

La dispersion de 1 à 2 s'obtient en considérant les flux partiels, en la bobine 2 d'abord :

1° Partie AB :

$$2\pi R_2\,\frac{4\pi}{10}\,\frac{n^2}{h}\,I_1\,\frac{I_2}{I_1}\,\frac{e_2}{3}.$$

2° Partie BC :

$$2\pi R_0 \frac{4\pi}{10} \frac{n^2}{h} I_1 \frac{I_2}{I_1} a_2.$$

3° Partie CD : En comptant toujours x depuis le bord externe gauche

$$\mathcal{B} = \frac{4\pi}{10} \frac{n}{h}\left[I_2 - \frac{I_1}{e_1} x\right],$$

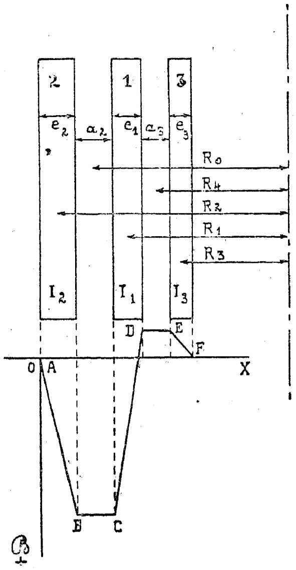


Figure 3. — Dispersion d'un transformateur à trois enroulements ; deuxième forme.

qui embrasse n spires et donne un flux par intégration :

$$2\pi R_1 \frac{4\pi}{10} \frac{n^2}{h} I_1\left[\frac{I_2}{I_1} e_1 - \frac{e_1}{2}\right].$$

4° Puis ensuite en la bobine 1, on a le même $\mathcal{B}$ appliqué à $\frac{x}{e_1}$ n spires, amenant pour le flux à

$$-2\pi R_1 \frac{4\pi}{10} \frac{n^2}{h} I_1\left[\frac{I_2}{I_1} \frac{e_1}{2} - \frac{e_1}{3}\right].$$

5° Les parties DEF agissent en sens inverse sur les bobines 1 et 2 et n'interviennent donc pas.

Au total, en appelant $R_{m1.2}$ le rayon moyen relatif aux bobines 1 et 2, nous aurons

$$\lambda_{1.2} = 2\pi R_{m1.2} \frac{4\pi}{10} \frac{n^2}{h}\left[\frac{I_2}{I_1}\left(\frac{e_2}{3} + a_2 + \frac{e_1}{2}\right) - \frac{e_1}{6}\right]$$

et de même

$$\lambda_{1.3} = 2\pi R_{m.1.3} \frac{4\pi}{10} \frac{n^2}{h} \left[\frac{I_3}{I_1} \left(\frac{e_3}{3} + a_3 + \frac{e_1}{2} \right) - \frac{e_1}{6} \right]$$

en considérant toujours les tensions données par $\lambda\omega I_1$.

Les inductances de dispersion déterminées entre 1 et 2, puis entre 1 et 3 séparément, sont :

$$l_{1.2} = 2\pi R_{m1.2} \frac{4\pi}{10} \frac{n^2}{h} \left[\frac{e_1}{3} + a_2 + \frac{e_2}{3} \right],$$

$$l_{1.3} = 2\pi R_{m1.3} \frac{4\pi}{10} \frac{n^2}{h} \left[\frac{e_1}{3} + a_3 + \frac{e_3}{3} \right].$$

De sorte que la présence du courant I_3 dans la bobine 3 devra faire considérer

$$\lambda_{1.2} = l_{1.2} \left(1 - \frac{I_3}{I_1} \frac{3e_1 + 6a_2 + 2e_2}{2e_1 + 6a_2 + 2e_2} \right),$$

et la présence du courant I_2 dans la bobine 2 devra faire considérer

$$\lambda_{1.3} = l_{1.3} \left(1 - \frac{I_2}{I_1} \frac{3e_1 + 6a_3 + 2e_3}{2e_1 + 6a_3 + 2e_3} \right).$$

VALEURS DES COEFFICIENTS DE PASSAGE DE l A λ.

Première forme. — Supposons divers rapports entre les a et les e ; nous obtiendrons :

$e_1 = e_2 = e_3 = a_1 = a_2$	$\lambda_{1.2} = l_{1.2}\left(1 + 1{,}100 \frac{I_3}{I_1}\right)$	$\lambda_{1.3} = l_{1.3}\left(1 - 0{,}500 \frac{I_2}{I_1}\right)$
$e_1 = \frac{3}{2} e_2 = \frac{3}{2} e_3 = \frac{1}{2} a_1 = \frac{1}{2} a_2$	. . . . . . 1,043 .	. . . . . 0,489 .
$e_1 = 2e_2 = 2e_3 = a_1 = a_2$	. . . . . . 1,055 .	. . . . . 0,472 .
$e_1 = \frac{2}{1{,}5} e_2 = \frac{2}{1{,}5} e_3 = \frac{1}{1{,}5} a_1 = \frac{2}{1{,}5} a_2$	. . . . . . 1,060 .	. . . . . 0,384 .
$e_1 = \frac{1}{0{,}7} e_2 = 2e_3 = a_1 = \frac{1}{0{,}6} a_2$	. . . . . . 1,075 .	. . . . . 0,399 .

En somme, les variations ne sont pas grandes autour de

$$\lambda_{1.2} = l_{1.2} \left(1 + 1{,}07 \frac{I_3}{I_1} \right),$$

$$\lambda_{1.3} = l_{1.3} \left(1 - 0{,}45 \frac{I_2}{I_1} \right).$$

Deuxième forme. — Faisons les suppositions suivantes :

$e_1 = e_2 = e_3 = a_2 = a_3$	$\lambda_{1.2} = l_{1.2}\left(1 - 1{,}100 \frac{I_3}{I_1}\right)$	$\lambda_{1.3} = l_{1.3}\left(1 - 1{,}100 \frac{I_2}{I_1}\right)$
$e_1 = 1{,}5e_2 = 1{,}5e_3 = 0{,}7a_2 = 0{,}7a_3$	. . . . . . 1,084 .	. . . . . 1,084 .
$e_1 = 1{,}5e_2 = 1{,}5e_3 = a_2 = a_3$	. . . . . . 1,107 .	. . . . . 1,107 .
$e_1 = \frac{1}{0{,}7} e_2 = 2e_3 = a_2 = a_3$	. . . . . . 1,106 .	. . . . . 1,111 .

Les variations sont faibles autour de

$$\lambda_{1.2} = l_{1.2}\left(1 - 1{,}1\frac{I_3}{I_1}\right) \quad \text{et} \quad \lambda_{1.3} = l_{1.3}\left(1 - 1{,}1\frac{I_2}{I_1}\right).$$

Remarques. — 1° On a supposé que h est le même pour tous les enroulements, ou la moyenne s'ils sont à très peu près de même hauteur. Les cas de h différents, comme ceux de prises mettant hors circuit des fractions importantes d'un ou plusieurs enroulements, demanderaient une étude plus complète, devenant du reste assez vite compliquée.

2° Nous ne cherchons en somme qu'à déterminer les rapports de λ à l à appliquer dans les formules que nous allons examiner ci-après. Si l'on a reconnu que, dans une certaine forme de transformateurs, il vaut mieux majorer h, par exemple, afin d'obtenir l conforme à l'expérience du court-circuit, nous ne changerons pas les rapports $\lambda : l$.

3 Les valeurs des λ deviennent négatives pour certaines intensités et phases des courants.

Calcul des chutes de tension au moyen des λ. — Le transformateur comporte un inducteur ou primaire et deux circuits induits, dont le secondaire considéré le plus souvent comme principal; l'autre, ou tertiaire, sera un circuit auxiliaire; c'est le cas de l'alimentation d'un compensateur synchrone, par exemple.

Pour choisir, nous prendrons comme origine des phases la tension secondaire en charge. Les courants I_1, I_2 et I_3 seront divisés en phase et en quadrature relativement à cette tension, en

$$I_{1A} = I_{2A} + I_{3A}$$
$$I_{1R} = I_{2R} + I_{3R}.$$

Ces courants peuvent être négatifs comme il a été dit plus haut. Par exemple si le circuit 3 envoie du courant réactif en avance I_{3R} est négatif; si 2 alimente un circuit ordinaire I_{2R} reste positif, de sorte que I_{1R} a l'un ou l'autre signe selon que le courant réactif sur la ligne primaire a un sens ou l'autre (à part le courant de magnétisation dont nous ne parlons pas).

La décomposition de I_3 en phase et en quadrature avec la tension U_2 se fera approximativement, la plupart du temps avec une exactitude suffisante. Si on le désire, il sera facile de le vérifier à la fin, et faire les retouches nécessaires s'il est besoin.

Nous aurons ainsi à considérer 4 inductances de forme λ qui sont :

$\lambda_{1.2}^{A}$ contenant $\frac{I_3^A}{I_1^A}$; $\lambda_{1.2}^{R}$ contenant $\frac{I_3^R}{I_1^R}$;

$\lambda_{1.3}^{A}$ contenant $\frac{I_2^A}{I_1^A}$; $\lambda_{1.3}^{R}$ contenant $\frac{I_2^R}{I_1^R}$;

avec les formules correspondant à la première ou à la seconde forme du transformateur.

Puis en suivant sur le diagramme (fig. 4), nous obtiendrons :

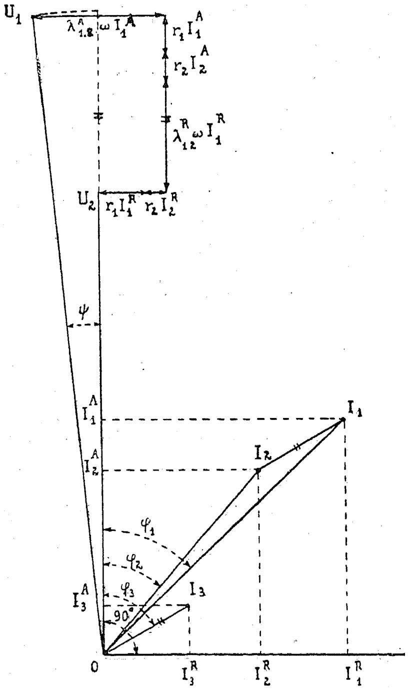


Figure 4. — Diagramme des chutes de tension d'un transformateur à trois enroulements.

Chute de tension approchée de l'enroulement 2 :

$$r_1 I_1^A + r_2 I_2^A + \lambda_{1.2}^{R} \omega I_1^R$$

et, en *deuxième approximation* nous ajouterons :

$$\frac{1}{2U_1} (\lambda_{1.2}^{A} \omega I_1^A - r_2 I_2^R - r_1 I_1^R)^2$$

provenant du développement en série de $1 - \cos \psi$.

On déterminera $r_1 r_2 r_3$ par le calcul de la résistance en courant continu, avec majorations dues aux courants parasites (voir *Bulletin de la Société française des Électriciens* de juillet 1930) ; ou bien, on mesurera $r_1 r_2 r_3$ au wattmètre par des essais de court-circuit (1.2), (1.3), (2.3) ce

qui donne trois équations. (A vrai dire la valeur r tirée d'un essai de court-circuit n'est pas théoriquement séparable en r_1 et r_2, par exemple, attribués respectivement aux circuits 2 et 3, mais il n'y a, en pratique, pas grand inconvénient à le faire, d'autant plus que les résistances n'interviennent pas comme les réactances, beaucoup plus fortes, sauf dans les très petits appareils).

On obtiendra de même :

Chute de tension approchée de l'enroulement 3

$$r_1 I_1^A + r_3 I_3^A + \lambda_{1.3}^R \omega I_1^R$$

et en *deuxième approximation*, nous ajouterons :

$$\frac{1}{2U_1}(\lambda_{1.3}^A \omega I_1^A - r_3 I_3^R - r_1 I_1^R)^2.$$

Les mêmes procédés peuvent être étendus aux transformateurs à plus de trois enroulements.

APPLICATIONS NUMÉRIQUES.

I. — Nous avons calculé un transformateur monophasé de 3000 k VA, sous la première forme, c'est-à-dire avec le primaire à l'une des extrémités radiales du cylindre que constituent les trois enroulements. Nous ramenons à une spire.

Primaire	30 V, 100000 A	
Secondaire	30 V, 100000 A	total combiné 100000 A.
Tertiaire	30 V, 50000 A	

Perte dans le primaire,	20 kW	$r_1 = 2.10^{-6}$ ohm.
Perte dans le secondaire	16 kW	$r_2 = 1{,}6.10^{-6}$ ohm.
Perte dans le tertiaire	16 kW	$r_3 = 6{,}4.10^{-6}$ ohm,
Perte totale admise	45 kW, dite normale.	

$$\text{Dispersion de 1 à 2, 3 inemployé} \ldots l_{1.2}\omega = \frac{2{,}5\text{V}}{10^5\text{A}} = 25.10^{-6} \text{ ohm}.$$

$$\text{Dispersion de 1 à 3, 2 inemployé} \ldots l_{1.3}\omega = \frac{4\text{V}}{10^5\text{A}} = 40.10^{-6} \text{ ohm}.$$

Ou bien, nous n'avons pas calculé le transformateur et nous avons mesuré en particulier $l_{1.2}\omega$ et $l_{1.3}\omega$ par deux essais de court-circuit entre deux circuits seuls, de la manière ordinaire usitée pour les transformateurs à deux circuits.

Si nous sommes dans ce dernier cas, et que nous n'ayons aucune idée des épaisseurs d'enroulements et de leurs distances, nous calculerons les λ au moyen des coefficients moyens indiqués ci-dessus, respectivement 1,07 ; 0,45 ; 1,10 ; 1,10, ou des valeurs voisines que

nous penserons mieux adaptées à ce qu'est le transformateur : tensions, régulation, points spéciaux

Mais en général on a une idée suffisante des épaisseurs d'enroulements et de leurs distances et on a ainsi une approximation meilleure. Dans le cas choisi, supposons les relations

$$a_2 = 0{,}6a_1,$$
$$e_1 = a_1,$$
$$e_2 = 0{,}7e_1,$$
$$e_3 = 0{,}5e_1.$$

Nous obtenons

$$\lambda_{1.2}\omega = 25.10^{-6}\left(1 + 1{,}0745\ \frac{I_3}{I_1}\right),$$

$$\lambda_{1.3}\omega = 40.10^{-6}\left(1 - 0{,}399\ \frac{I_2}{I_1}\right).$$

Première charge considérée. — Secondaire en pleine charge,

$$\cos\varphi_2 = 0{,}8.$$

Tertiaire à circuit ouvert

$I_1 = I_2 = 10^5$; $I_3 = 0$; $I_2^R = I_1^R = 0{,}6.10^5$; $I_2^A = I_1^A = 0{,}8.10^5$.

$$\lambda_{1.2}^A\omega = 25.10^{-6},$$
$$\lambda_{1.2}^R\omega = 25.10^{-6},$$
$$\lambda_{1.3}^A\omega = 24{,}04.10^{-6},$$
$$\lambda_{1.3}^R\omega = 24{,}04.10^{-6}.$$

Chute de tension de 2. — Première approximation 6,0 pour 100.
Deuxième approximation 6,1 pour 100.

Chute de tension de 3. — Première approximation 5,3 pour 100.
Deuxième approximation 5,5 pour 100.

Deuxième charge considérée. — Le secondaire est en pleine charge avec $\cos\varphi_2 = 0{,}8$ encore. Mais le tertiaire est fermé sur un compensateur synchrone, avec déphasage du courant en avant, $\cos\varphi_3 = 0{,}05$ et un courant de 40000 A. Faisons le tableau des courants :

$I_2^A = 0{,}8.10^5$	$I_2^R = 0{,}6.10^5$	$I_2 = 10^5$
$I_3^A = 0{,}02.10^5$	$I_3^R = -0{,}4\ 10^5$	$I_3 = 0{,}4\ 10^5$
$I_1^A = 0{,}82.10^5$	$I_1^R = 0{,}2.10^5$	$I_1 = 0{,}844.10^5$,

puis celui des $\lambda\omega$:

$$\lambda_{1.2}^A\omega = 25{,}0.10^{-6},$$
$$\lambda_{1.2}^R\omega = 21{,}3.10^{-6},$$
$$\lambda_{1.3}^A\omega = 24{,}4.10^{-6},$$
$$\lambda_{1.3}^R\omega = -7{,}88\ 10^{-6}.$$

Chute de tension de 2. — Première approximation 2,4 pour 100.
Deuxième approximation 2,6 pour 100.

Chute de tension de 3. — Première approximation 0,1 pour 100.
Deuxième approximation 0,3 pour 100.

Troisième charge considérée. — Le secondaire est en pleine charge avec $\cos \varphi_2 = 0{,}95$. Le tertiaire est poussé à 50000 A avec $\cos \varphi_3 = 0{,}04$, déphasage du courant en avant. Faisons le tableau des courants :

$I_2^A = 0{,}95.10^5$	$I_2^R = 0{,}312.10^5$	$I_2 = 10^5$
$I_3^A = 0{,}02.10^5$	$I_3^R = -0{,}5.10^5$	$I_3 = 0{,}5.10^5$
$I_1^A = 0{,}97.10^5$	$I_1^R = -0{,}188.10^5$	$I_1 = 0{,}988.10^5$,

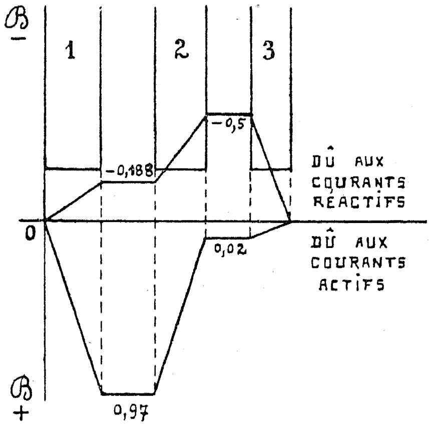


Figure 5. — Exemple de dispersion avec courant fortement réactif et déphasé en avant dans le tertiaire.

ce qui met le transformateur en surcharge de 15 pour 100 pour le total des pertes Joule.

Puis nous avons :

$$\lambda_{1.2}^A \omega = 25.10^{-6},$$
$$\lambda_{1.2}^R \omega = 30.10^{-6},$$
$$\lambda_{1.3}^A \omega = 24{,}4.10^{-6},$$
$$\lambda_{1.3}^R \omega = 66{,}7.10^{-6}.$$

Chute de tension de 2. — Première approximation — 0,7 pour 100.
Deuxième approximation — 0,4 pour 100.

Chute de tension de 3. — Première approximation — 3,5 pour 100.
Deuxième approximation — 3,1 pour 100.

Avec cette charge, les chutes de tension sont négatives, à peu près nulles pour le circuit 2. Si nous traçons $\mathcal{B}$, il est selon la fig. 5. La composante active, toujours positive crée des chutes de tension presque en quadrature. La composante réactive, qui est négative, crée

des chutes de tension négatives presque en phase. Dans la région 1.2, les deux composantes équilibrent à peu près leurs actions. Dans la région 2.3, l'influence de $\mathcal{B}$ négatif des courants réactifs l'emporte et la chute de tension négative apparaît nettement.

II. — Prenons maintenant un transformateur de deuxième forme, avec le primaire central. Il est toujours de même puissance, monophasé 30000 kVA. Nous ramenons encore à une spire :

Primaire 30 V; 100000 A; $r_1 = 2{,}10^{-6}$ ohm.
Secondaire 30 V; 100000 A; $r_2 = 1{,}6.10^{-6}$ ohm.
Tertiaire 30 V; 50000 A; $r_3 = 6{,}4.10^{-6}$ ohm.

L'essai de court-circuit, avec deux circuits seuls en action, a donné

$$l_{1.2}\omega = 25.10^{-6} \text{ ohm},$$
$$l_{1.3}\omega = 24.10^{-6} \text{ ohm}.$$

Nous avons enfin $a_2 = a_3 = e_1 = \dfrac{1}{0{,}7}\, e_2 = \dfrac{1}{0{,}5}\, e_3.$

De là
$$\lambda_{1.2}\omega = 25.10^{-6}\left(1 - 1{,}106\,\frac{I_3}{I_1}\right),$$
$$\lambda_{1.3}\omega = 24.10^{-6}\left(1 - 1{,}111\,\frac{I_2}{I_1}\right).$$

Première charge considérée. — Comme ci-dessus pour les courants et phases :

$$\lambda_{1.2}^{A}\omega = 25.10^{-6},$$
$$\lambda_{1.2}^{R}\omega = 25.10^{-6},$$
$$\lambda_{1.3}^{A}\omega = -2{,}67.10^{-6},$$
$$\lambda_{1.3}^{R}\omega = -2{,}67.10^{-6}.$$

Chute de tension de 2. — Première approximation 6,0 pour 100.
Deuxième approximation 6,1 pour 100.
Chute de tension de 3. — Première approximation 0
Deuxième approximation 0,1 pour 100.

Deuxième charge considérée. — Comme ci-dessus pour les courants et phases.

$$\lambda_{1.2}^{A}\omega = 24{,}3.10^{-6},$$
$$\lambda_{1.2}^{R}\omega = 80{,}3.10^{-6},$$
$$\lambda_{1.3}^{A}\omega = -2{,}0.10^{-6},$$
$$\lambda_{1.3}^{R}\omega = -56{,}0.10^{-6}.$$

Chute de tension de 2. — Première approximation 6,3 pour 100.
Deuxième approximation 6,5 pour 100.
Chute de tension de 3. — Première approximation −3,1 pour 100.
Deuxième approximation −3,1 pour 100.

Troisième charge considérée. — Comme ci-dessus pour les courants et phases

$$\lambda_{1.2}^{A}\omega = 21,4.10^{-6},$$
$$\lambda_{1.2}^{R}\omega = -48,5.10^{-6},$$
$$\lambda_{1.3}^{A}\omega = -2,2.10^{-6},$$
$$\lambda_{1.3}^{R}\omega = 68,3.10^{-6}.$$

Chute de tension de 2. — Première approximation 4,2 pour 100.
Deuxième approximation 4,5 pour 100.

Chute de tension de 3. — Première approximation —3,6 pour 100.
Deuxième approximation —3,6 pour 100.

SUR LA DÉFINITION, LA SIGNIFICATION PHYSIQUE ET L'EMPLOI EN ÉLECTROTECHNIQUE DES DIVERSES INDUCTANCES RELATIVES A DEUX ENROULEMENTS (1)

par M. A. Mauduit.

Directeur de l'Institut d'Electrotechnique et de Mécanique appliquée de Nancy.

On distingue couramment ce qu'on appelait autrefois le *coefficient d'induction propre* ou de *self induction* d'un circuit et le *coefficient d'induction mutuelle* entre deux circuits. Il y a quelques années déjà, on a fait remarquer que l'expression coefficient d'induction était impropre, parce qu'on devrait réserver le nom de coefficient à une quantité sans dimension, alors que le coefficient d'induction a les dimensions d'une longueur dans le système électromagnétique; il a été alors proposé de remplacer les anciennes désignations par l'expression *inductance* et de désigner les grandeurs en question par *inductance propre d'un circuit* et *inductance mutuelle entre deux circuits*. Dans ces derniers temps, nous avons constaté que plusieurs auteurs utilisaient l'expression *coefficient d'inductance* ; cet usage nous paraît critiquable et nous estimons qu'il devrait disparaître.

1° *Inductances propres, mutuelles et de fuites de deux spires.*

Considérons, pour fixer les idées, un système simple de deux enroulements, constitués chacun par une seule spire plane (fig. 1) ; supposons qu'il passe un courant continu i_1 dans la spire 1 et i_2 dans la spire 2. Les flux *résultants* F_1 et F_2 dans les deux spires sont des fonctions linéaires des courants i_1 et i_2 et peuvent se mettre sous forme

$$\left.\begin{aligned} F_1 &= L_1 i_1 + M i_2 \\ F_2 &= L_2 i_2 + M i_1 \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

Dans ce système, L_1 et L_2 désignent les inductances propres des deux spires, dans lesquelles il est fait choix d'un même sens positif pour les courants, de telle sorte que l'inductance mutuelle M entre les deux

---

(1) Communication présentée le 8 janvier 1931 à la 1re Section et devant être discutée pendant la semaine de novembre 1931.

spires soit positive. On peut écrire le système (1) d'une façon différente, sous la forme

$$\left.\begin{aligned} F_1 &= (L_1 - M)i_1 + M(i_1 + i_2) = l_1 i_1 + M(i_1 + i_2) \\ F_2 &= (L_2 - M)i_2 + M(i_1 + i_2) = l_2 i_2 + M(i_1 + i_2) \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

La différence $L_1 - M$ constitue ce qu'on appelle l'*inductance partielle de fuite* de la spire 1 et nous la désignons par la notation l_1 ; de même pour la spire 2.

Notons que les inductances propres L_1 et L_2 et l'inductance mutuelle M peuvent être facilement déterminées par des essais en courant alternatif; il suffit, en effet, de faire passer dans l'enroulement 1 un courant alternatif sinusoïdal de pulsation ω et de valeur efficace I_1 et de mesurer

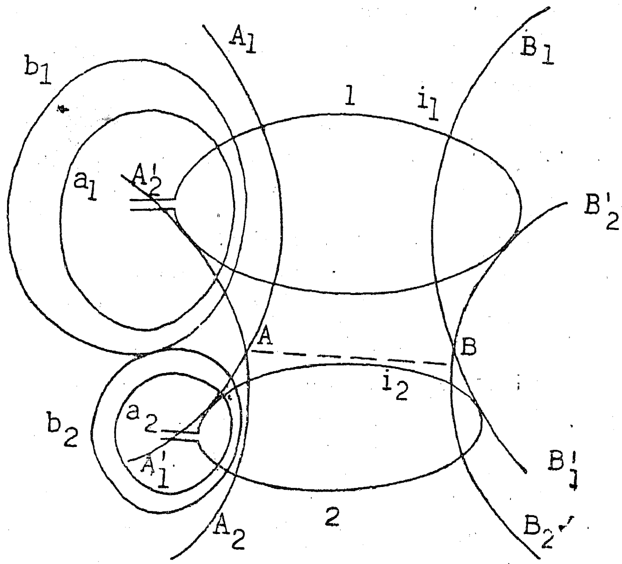


Fig. 1. — Champs individuel de deux spires

la tension U_1 appliquée à la spire 1 ; on a alors la relation, en valeurs efficaces,

$$U_1 = I_1\sqrt{R_1^2 + L_1^2\omega^2} \qquad (3)$$

relation de laquelle on déduit facilement L_1, si on connaît la résistance R_1, mesurée directement.

Pour obtenir l'inductance mutuelle, il suffit de mesurer, avec un appareil ne consommant pas de courant, la tension U_2 aux bornes de la spire 2 pendant cet essai ; on a alors la relation

$$U_2 = M_2\omega I_1. \qquad (4)$$

Les inductances partielles de fuites l_1 et l_2 seront alors données par les différences $L_1 - M$ et $L_2 - M$.

2° *Interprétation physique des diverses inductances de deux spires.*

Lorsque la spire 1 est seule parcourue par le courant unité, l'inductance propre L_1, appelée quelquefois aussi la *pleine inductance ou l'inductance totale* de la spire, représente le flux total produit au travers de la spire 1 et l'inductance mutuelle M, la portion du flux, produit par la spire 1, qui traverse la spire 2 ; l'inductance de fuites l_1 est alors la portion du flux produit par la spire 1 qui ne traverse pas la spire 2 (lignes de force A et B de la figure 1). Les définitions sont analogues pour la spire 2, supposée parcourue seule à son tour par le courant unité.

Supposons maintenant les deux spires parcourues par les courants respectifs i_1 et i_2, pris positivement dans un même sens dans les deux spires (inductance mutuelle M positive) et considérons par exemple, des spires disposées comme dans la figure 1. Voyons alors à quoi correspondent physiquement les différents termes du système (2).

Dans un article, d'ailleurs très intéressant, paru dans *l'Elektrotechnische Zeitschrift* du 28 août 1930, intitulé « qu'est-ce que la dispersion et comment la calcule-t-on ? », le D^r^ E. Weber de Berlin s'étonne de ce que l'interprétation physique de ces termes semble en contradiction avec la définition tirée du système (2). Il indique que l'expression M $(i_1 + i_2)$ représente les lignes de force communes aux deux spires, c'est-à-dire traversant les deux spires, dans le spectre magnétique résultant.

Traçant alors ce spectre magnétique (1), pour le cas de deux spires constituées chacune par deux fils parallèles indéfinis situés dans des plans horizontaux et parcourus, la spire 1 par un courant double de celui de la spire 2 et en sens contraire, il constate, comme le montre la figure 2 extraite de cet article (fig. 9, page 1225), qu'aucune ligne de force produite dans la spire 1 ne traverse la spire inférieure 2, alors que l'expression M $(i_1 + i_2)$ égale ici à 1/2 M i_1, n'est pas nulle et il cherche, par des considérations très compliquées, à expliquer cette anomalie.

Dans une lettre adressée à l'Elektrotechnische Zeitschrift le 15 novembre dernier, nous avons fait remarquer que cette prétendue anomalie provient d'une interprétation physique incorrecte du terme

(1) Si on appelle r_1 et r'_1, r_2 et r'_2 les distances respectives d'un point aux fils A_1 et B_1, A_2 et B_2 et i_1 et i_2 les courants dans les spires, l'équation des lignes de force est,

$$\left(\frac{r_1}{r'_1}\right)^{i_1}\left(\frac{r_2}{r'_2}\right)^{i_2} = C.$$

$M\ (i_1 + i_2)$. Ce terme ne représente pas du tout le flux commun aux deux spires dans le spectre résultant, mais a une tout autre signification physique. Si nous reprenons dans la figure 1 le flux produit par la spire 1, seule excitée, à travers la spire 2, nous trouvons que ce flux est limité par une surface $A_1A'_1B_1B'_1$ s'appuyant sur la courbe de la spire 2. De même, le flux produit par la spire 2, seule excitée, à travers la spire 1, est limité par la surface analogue $A_2A'_2B_2B'_2$ s'appuyant sur la courbe de la spire 1. Ces deux surfaces se coupent suivant une intersection AB, plane ou gauche, et il est évident que l'expression $M(i_1 + i_2)$ représente l'ensemble des lignes de force du spectre résultant qui traversent la section AB, lorsque les spires 1 et 2 sont parcourues simultanément par les courants i_1 et i_2.

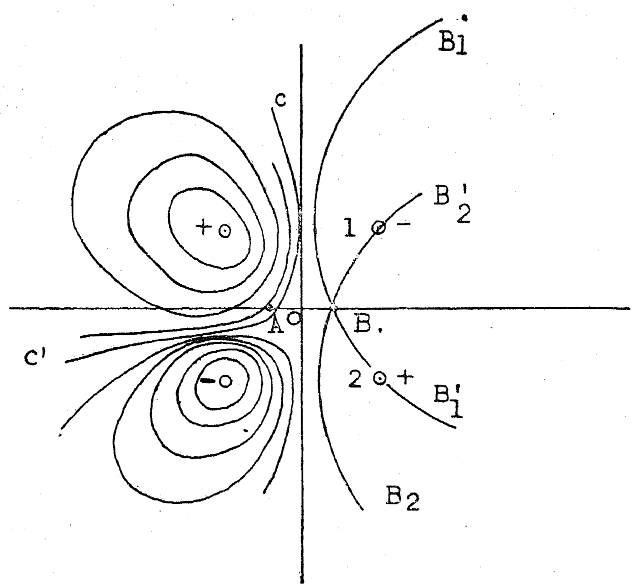


Fig. 2. — Champ résultant de deux spires avec courants inverses $\begin{cases} i_1 = 2 \\ i_2 = -1 \end{cases}$

Dans la figure 2, il est facile de tracer les sections planes circulaires des cylindres qui constituent les surfaces limites en question et ces cylindres, $B_1B'_1$ et $B_2B'_2$, dont les traces sont indiquées du côté droit de la figure 2, se coupent suivant un rectangle, dont deux côtés, perpendiculaires au plan de la figure, sont projetés en A et B. Lorsque les deux spires indéfinies parallèles sont identiques, le plan de ce rectangle est évidemment situé dans le plan médian parallèle aux deux spires.

Il est facile de voir, sur la figure 2, tracée dans le cas où le courant i_1 est double du courant i_2 et de sens contraire, qu'il y a un certain

nombre de lignes de forces qui traversent cette section AB (type CC') et correspondent à l'expression M $(i_1 + i_2)$, alors que ces lignes de force se ferment toutes sans traverser la spire 2.

Pour un courant i_1, triple du courant i_2, on aurait des lignes de force du groupe M $(i_1 + i_2)$qui traverseraient la spire 2.

Il n'y a donc aucune anomalie dans ce spectre magnétique, mais seulement une erreur d'interprétation de l'auteur allemand, relativement à la signification physique du terme M $(i_1 + i_2)$.

L'interprétation physique correcte des termes du système (2) est donc la suivante : M $(i_1 + i_2)$ représente l'ensemble des lignes de force du spectre résultant qui traversent ce que nous pouvons appeler la section commune aux deux circuits magnétiques des spires 1 et 2, ou, en précisant la définition, la section plane ou gauche des deux surfaces limites correspondant la première, au flux produit par la spire 1 seule excitée à travers la spire 2 et la seconde, au flux produit par la spire 2 seule excitée à travers la spire 1.

Les inductances partielles de fuites l_1 et l_2 correspondent successivement aux lignes de force du spectre total traversant respectivement les spires 1 et 2, sans passer par la section commune AB. (Toutes les lignes de la figure 1, sauf *cc'*).

3° *Coefficients v d'Hopkinson et coefficient de dispersion σ de Blondel, dans le cas de deux spires.*

Considérons la spire 1 seule parcourue par un courant i_1 ; ce courant produira un flux Φ_1, dit *utile*, traversant la spire 2 et un flux total $v_1\Phi_1$; la différence $(v_1 - 1)\Phi_1$ constitue le flux de fuite $l_1 i_1$. De même, pour la spire 2 supposée seule parcourue par un courant i_2, on aura le flux total $v_2\Phi_2$ et le flux utile Φ_2 à travers la spire 1.

Dans ces conditions, les flux résultants dans les deux spires peuvent être mis sous la forme :

$$\left.\begin{aligned} F_1 &= v_1\Phi_1 + \Phi_2 \\ F_2 &= v_2\Phi_2 + \Phi_1. \end{aligned}\right\} \quad (5)$$

Si on compare ce système avec les précédents, on en déduit les relations ci-dessous :

$$\left.\begin{aligned} v_1 &= \frac{L_1}{M} = 1 + \frac{l_1}{M} \\ v_2 &= \frac{L_2}{M} = 1 + \frac{l_2}{M}. \end{aligned}\right\} \quad (6)$$

Blondel a défini un coefficient σ de dispersion par la relation

$$\sigma = 1 - \frac{1}{v_1 v_2} = \frac{L_1 L_2 - M_2}{L_1 L_2}. \tag{7}$$

Si on introduit les inductances partielles de fuites l_1 et l_2, ce coefficient σ a pour valeur

$$\sigma = \frac{(l_1 + l_2)M + l_1 l_2}{M^2 + (l_1 + l_2)M + l_1 l_2} \tag{8}$$

expression qui peut être simplifiée, dans certains cas, en négligeant le produit $l_1 l_2$ à côté des autres termes, suivant la forme

$$\sigma \cong \frac{1}{1 + \frac{l_1 + l_2}{M}} \cong 1 - \frac{l_1 + l_2}{M}. \tag{9}$$

4° *Inductance de fuites totales de Boucherot.*

M. Boucherot a introduit des inductances de fuites d'un type nouveau, qu'il a appelées inductances totales de fuites rapportées à un enroulement.

Entre les inductances L_1 et L_2, l_1 et l_2, et M, on peut écrire la relation

$$(L_1 - l_1)(L_2 - l_2) = M^2. \tag{10}$$

Si on rapporte toutes les fuites à la spire 1, sous forme d'une inductance N_1, cette relation devient

$$(L_1 - N_1)L_2 = M^2 \tag{11}$$

ce qui définit l'inductance de fuites de Boucherot, qui peut s'écrire

$$N_1 = L_1 - \frac{M^2}{L_2} = \sigma L_1. \tag{12}$$

Si on introduit les inductances partielles de fuites l_1 et l_2 cette relation devient

$$N_1 = l_1 + l_2 \frac{M}{L_2} = l_1 + \frac{l_2}{v_2}. \tag{13}$$

Ceci montre que l'inductance de fuites Boucherot de la spire 1 n'est pas égale à la somme des inductances partielles de fuites l_1 et l_2, mais à la somme de l_1 et de l_2 affectée du coefficient de réduction $\frac{M}{L_2}$.

Nous verrons plus loin la raison de ce coefficient.

On trouverait de même pour N_2.

$$N_2 = L_2 - \frac{M_2}{L_1} = \sigma L_2 = l_2 + l_1 \frac{M}{L_1} = l_2 + \frac{l_1}{v_1}. \tag{13 bis}$$

Pour interpréter physiquement l'inductance de fuites de Boucherot, supposons que, dans les spires 1 et 2, passent des courants i_1 et i_2 de sens inverses et tels que le *flux résultant soit nul dans la spire* 2. Le système (5) donne alors, en prenant Φ_2 positivement,

$$\begin{aligned} F_1 &= v_1\Phi_1 - \Phi_2 \\ F_2 &= \Phi_1 - v_2\Phi_2 = 0 \end{aligned} \quad \text{d'où} \quad \left.\begin{aligned} \Phi_2 &= \frac{\Phi_1}{v_2} \\ F_1 &= \sigma v_1\Phi_1 = \sigma L_1 i_1 = N_1 i_1 . \end{aligned}\right\} \qquad (14)$$

Les relations (14) montrent que l'inductance Boucherot de la spire 1 est le flux résultant à travers cette spire, lorsqu'elle est parcourue par le courant unité, la spire 2 étant parcourue par un courant de sens inverse et de valeur telle que le flux résultant y soit nul.

Si on trace le spectre magnétique dans ce cas, on trouvera que la spire 2 est traversée par un certain nombre de lignes de force produites par elle-même en sens inverse, de telle façon que le nombre de tubes de force soit le même dans les deux sens, ce qui aboutit à un flux total nul.

En réalité, l'inductance de Boucherot est la somme des fuites des deux spires dans les conditions fixées par la valeur nulle du flux résultant dans la spire 2, c'est-à-dire quand le courant dans la spire 2 est égal au courant de la spire 1, affecté du coefficient $\frac{M}{L_2}$ ou $\frac{1}{v_2}$, ce qui réduit les fuites de la spire 2 dans la même proportion.

5° *Théorème relatif à la variation du flux dans une spire en court-circuit.*

Lorsqu'un flux variable traverse une spire en court-circuit de résistance assez faible pour être pratiquement négligeable, chaque variation du flux produit une force électromotrice qui engendre un courant s'opposant à cette variation. Si on considère le flux résultant F dans la spire, sa variation donne naissance à une force électromotrice $\frac{-dF}{dt}$, qui doit faire équilibre à la chute de tension ri dans la spire ; cette chute de tension étant très petite, pratiquement négligeable, on obtient la relation

$$-\frac{dF}{dt} = ri = 0. \qquad (15)$$

Il en résulte donc que, s'il y a un flux à travers une spire en court-circuit, ce flux ne peut subir de variations instantanées, d'où le théorème dont il est fait un grand usage en électrotechnique :

Dans une spire en court-circuit, il ne peut se produire de variation

instantanée du flux résultant ; en particulier, *à travers une spire en court-circuit*, le flux *résultant alternatif* est forcément *nul*.

L'inductance de fuites de Boucherot s'introduit immédiatement dans le cas où l'une des deux spires en présence est en court-circuit; le flux variable dans la spire non en court circuit, parcourue par un courant variable i_1 est à chaque instant donné par la relation

$$F = N_1 i_1 \qquad (15\ bis)$$

6° *Généralisation pour les enroulements à plusieurs spires confondues.*

Si chacune des bobines 1 et 2 comporte plusieurs spires de section suffisamment faible pour que l'épaisseur totale de l'enroulement soit négligeable, les notions établies plus haut sont généralisées aisément, en remarquant que les inductances, propres et de fuites, sont proportionnelles au carré des nombres de spires des bobines considérées, et l'inductance mutuelle, au produit des deux nombres de spires.

On peut alors conserver la notion de flux magnétique sous la même forme, en tenant compte des nombres de spires.

Désignons par m_1 et m_2 les nombres de spires des deux bobines et par $\lambda = \frac{m_1}{m_2}$ le rapport du nombre de spires de la bobine 1 à celui de la bobine 2.

Le système (1) peut alors s'écrire

$$F_1 = \frac{L_1}{m_1} i_1 + \frac{M}{m_1} i_2$$

$$F_2 = \frac{L_2}{m_2} i_2 + \frac{M}{m_2} i_1,$$

on en déduit, par comparaison avec (5),

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= \frac{L_1}{M}\frac{m_2}{m_1} = \frac{L_1}{\lambda M} \\ v_2 &= \frac{L_2}{M}\frac{m_1}{m_2} = \frac{\lambda L_2}{M} \end{aligned} \right\} \qquad (16)$$

On peut également écrire le système (2) ; en ajoutant et retranchant $\frac{\lambda M}{m_1} i_1$ à la première équation,

$$F_1 = \frac{L_1 - \lambda M}{m_1} i_1 + \frac{M}{m_1}(\lambda i_1 + i_2) = \frac{l_1}{m_1} i_1 + \frac{M}{m_1}(\lambda i_1 + i_2),$$

d'où la relation de définition de l_1, et par analogie de l_2,

$$\left.\begin{aligned} l_1 &= L_1 - \lambda M \\ l_2 &= L_2 - \frac{M}{\lambda} \end{aligned}\right\} \qquad (17)$$

l'équation (10) restant vérifiée, savoir

$$(L_1 - l_1)(L_2 - l_2) = M^2.$$

Si on connaît λ, on peut déterminer l_1 et l_2 par les relations (17) en mesurant L_1, L_2 et M en courants alternatifs, comme il a été expliqué au § 2.

Les définitions du coefficient de dispersion σ de Blondel par les relations (7) et de l'inductance totale de fuites Boucherot par les relations (11) et (12) ne sont pas modifiées.

Dans les équations (13) et (13 *bis*), les termes contenant des coefficients v sont seuls à modifier, sous la forme

$$\left.\begin{aligned} N_1 &= l_1 + l_2 \frac{\lambda M}{L_2} = l_1 + \frac{\lambda^2 l_2}{v_2} \\ N_2 &= l_2 + l_1 \frac{M}{\lambda L_1} = l_2 + \frac{l_1}{\lambda^2 v_1}. \end{aligned}\right\} \qquad (18)$$

7° *Enroulements à plusieurs spires confondues contenant du fer.*

Tant que le fer travaille au-dessous du coude de la saturation, si on néglige les variations de la perméabilité pour les très faibles inductions, on peut admettre que la réluctance du circuit magnétique reste

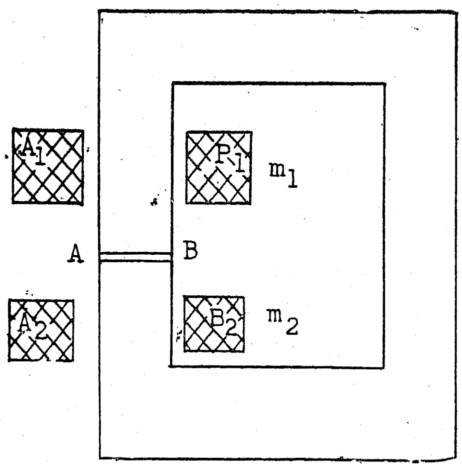


Fig 3. — Bobines avec fer

constante. Dans ces conditions, les inductances et les coefficients définis plus haut conservent leurs propriétés et peuvent être employés comme en l'absence de fer. Le circuit type, donné dans la figure 3, comprend

une bobine A_1B_1 de m_1 spires confondues et une bobine A_2B_2 de m_2 spires. Ces deux bobines sont traversées par un circuit magnétique en tôles de fer, qui peut contenir un entrefer AB placé entre les deux bobines. Le circuit magnétique commun aux deux bobines est constitué principalement par l'anneau de tôles, mais il comprend en plus un petit nombre de lignes de force passant dans l'air. On considère souvent comme section commune aux deux bobines la section de l'entrefer AB, lorsqu'il existe, et à défaut de cet entrefer, une section de l'anneau de tôles située entre les deux bobines ; dans ces conditions, les fuites des bobines 1 et 2 correspondent respectivement aux lignes de force qui, dans le spectre résultant, traversent séparément les deux bobines sans passer par cette section commune AB.

Lorsque la saturation commence, les propriétés du système deviennent très différentes ; en effet, les pleines inductances L_1 et L_2 varient avec l'état de saturation de l'anneau et, par suite, avec les courants dans les bobines ; l'inductance mutuelle M est également variable et même prend une valeur différente d'après l'enroulement choisi comme magnétisant. Ces inductances propres et mutuelles ne peuvent donc plus être utilisées pour l'étude correcte des phénomènes.

En particulier, pour le calcul correct des forces électromotrices développées par les variations de courant, il faut écrire

$$e = -\frac{d(Li)}{dt} = -L\frac{di}{dt} - i\frac{dL}{dt},$$

ce qui donne des équations pratiquement inutilisables.

Les coefficients v d'Hopkinson et le coefficient de dispersion σ de Blondel sont également variables avec l'état de saturation.

Par contre, en ce qui concerne les inductances partielles de fuites l_1 et l_2, on peut continuer à les utiliser, car elles restent sensiblement indépendantes de la saturation, puisque les flux, auxquels elles correspondent, comportent un trajet très important dans l'air, dont la réluctance constante est assez importante pour qu'on puisse négliger, à côté de celle-ci, les faibles réluctances relatives au trajet dans le fer.

Pour étudier de pareils systèmes, on les caractérise souvent par ces inductances de fuite l_1 et l_2 et par le flux Φ commun aux deux bobines, que l'on prend généralement égal au flux moyen dans l'anneau de tôles.

Ce flux se calcule alors en partant de la f.m.m. résultante des deux bobines

$$\mathcal{F} = \frac{4\pi}{10}(m_1 i_1 + m_2 i_2), \tag{19}$$

par les relations

$$\Phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}} = \mathcal{C}\mathcal{F} \tag{20}$$

dans lesquelles $\mathcal{R}$ représente la réluctance et $\mathcal{C}$ la perméance du circuit, pour l'état de saturation correspondant. Quand on part du flux, la f.m.m. se calcule immédiatement, mais quand on part de la f.m.m., le flux ne peut être en général calculé que par tâtonnements, à moins que l'anneau de tôles n'ait partout la même section.

Dans ce cas, le calcul du flux se fait aisément en utilisant la notion d'ampère-tours par centimètre pour une induction donnée ; au besoin, on construit un graphique, s'il existe un entrefer.

On fait alors intervenir le flux de fuites par les inductances l_1 et l_2.

Reste à examiner ce que devient l'inductance totale de fuites de Boucherot. Le plus souvent, lorsqu'un des deux enroulements est en court circuit, le flux résultant dans l'autre bobine correspond à une induction qui ne peut aboutir à la saturation des tôles que pour des courants très importants ; tant que le coude de la saturation n'est pas atteint, l'inductance N_1 reste évidemment constante, alors que les inductances L_1, L_2 ou M correspondraient déjà à une forte saturation pour le même courant i_1.

Dans ces conditions, bien que l'inductance N_1 soit égale au produit σL_1, elle garde une valeur constante, alors que σ et L_1 sont tous deux variables.

Lorsque les inductances de fuite l_1 et l_2 sont relativement faibles, l'inductance de fuites N_1 est très voisine de la somme des inductances partielles de fuites rapportées à la bobine 1, si bien que très souvent on confond ces deux expressions.

8° *Bobines massives contenant du fer.*

Ce cas correspond à la figure 3, dans laquelle on remplace les gros points, figurant les paquets de spires confondues, par des rectangles d'une section appréciable.

Dans ce cas, il n'est pas possible de définir exactement le *flux magnétique* du circuit, car le flux n'est plus le même à travers les différentes spires. *En dehors de toute saturation*, on peut continuer à définir les *inductances propres* et *mutuelles*, en considérant les *flux totalisés dans les différentes spires*, mais dès que la saturation intervient, ces définitions perdent à nouveau leur intérêt.

On a l'habitude, en électrotechnique, de conserver la notion de flux, en considérant un certain flux moyen dans les différentes spires, aussi

bien pour les inductances propres et mutuelles que pour les inductances de fuites. On peut encore conserver, pour les inductances des fuites, les définitions données dans le système (17) dans lequel on tient compte du rapport,

$$\lambda = \frac{m_1}{m_2}, \tag{21}$$

mais il est évident que la définition ainsi établie n'est plus précise, pas plus d'ailleurs que toutes les considérations reposant sur cette sorte de flux moyen.

En envisageant la question sous ce point de vue, on comprend pourquoi divers auteurs indiquent que ces inductances de fuites l_1 et l_2 ne sont pas susceptibles d'une définition précise ; toutefois, la définition tirée du système (17) est au moins aussi admissible que beaucoup d'autres approximations pratiquées dans ce genre de calculs.

Les même auteurs signalent généralement que la seule inductance de fuites, susceptible d'une définition précise, est l'inductance N de Boucherot, par la relation $(L_1 - N_1)L_2 = M^2$. Ce point est exact, mais, comme contre-partie, il faut signaler que cette inductance N cesse d'être admissible quand la saturation commence.

Dans le rapport de transformation à vide des transformateurs, ce qui intervient, ce sont en réalité, en dehors de toute saturation, les inductances propres et mutuelles L_1 et M, ou avec saturation, le flux principal Φ et l'inductance partielle de fuites l_1 définie et mesurée par la différence $L_1 - \lambda M$, prise en dessous de la saturation ; l'essai Kapp donne l'inductance N_1 de Boucherot, voisine de $l_1 + \lambda^2 l_2$ qu'on lui substitue généralement.

9° *Bobinages répartis monophasés et polyphasés.*

Lorsque, au lieu d'un bobinage massif comme celui d'un transformateur, on considère un enroulement réparti en plusieurs entailles à la périphérie d'un stator ou d'un rotor, dans lequel les diverses spires sont traversées par des flux différents non seulement en grandeur, mais aussi en phase, la notion de flux moyen à travers ces spires devient de plus en plus confuse. On la maintient cependant, pour la commodité des recherches, en introduisant dans le calcul du flux produit par un pareil enroulement un *coefficient de bobinage* ou de *chevauchement* K, en même temps qu'un coefficient analogue k pour le calcul des f.é.m. engendrées par ces flux.

La question se complique encore dans les circuits polyphasés où l'on envisage le flux tournant résultant de la combinaison des flux alter-

natifs des diverses phases : on en tient compte en prenant les coefficients K et k en conséquence.

En dehors de toute saturation, on continue à pouvoir utiliser les inductances propres et mutuelles, en distinguant celles qui s'appliquent à chaque phase individuellement et celles qui se rapportent aux flux tournants, c'est-à-dire compte tenu de l'action mutuelle entre phases. M. Blondel a appelé ces dernières des inductances *cycliques* et pour les distinguer, il propose de les désigner par $\mathcal{L}$ et $\mathcal{M}$ en réservant la notation L et M pour les inductances individuelles des phases.

L'inductance cyclique de fuites de Boucherot $\mathcal{N}_1$ rapportée à l'enroulement 1, est alors définie par la relation correspondante entre les inductances cycliques propres et mutuelles prises en-dessous de la saturation,

$$(\mathcal{L}_1 - \mathcal{N}_1)\mathcal{L}_2 = \mathcal{M}^2. \qquad (22)$$

Les inductances partielles de fuites l_1 et l_2 représentent une notion beaucoup plus confuse ou tout au moins plus difficile à préciser. On continue souvent à les définir par les relations (17) dans lesquelles λ représente le rapport des nombres de spires, compte tenu de coefficients de bobinage convenables que l'on prend généralement égaux à K ou k, en les considérant comme respectivement proportionnels, ce qui donne

$$\left.\begin{aligned} \lambda &= \frac{K_1 m_1}{K_2 m_2} = \frac{k_1 m_1}{k_2 m_2} \\ l_1 &= \mathcal{L}_1 - \frac{\lambda \mathcal{M}}{\mathcal{L}_2} \\ l_2 &= \mathcal{L}_2 - \frac{\mathcal{M}}{\lambda \mathcal{L}_1} \end{aligned}\right\} \qquad (23)$$

Une pareille définition est évidemment très grossièrement approchée ; mais c'est là un sort commun à beaucoup de calculs magnétiques de machines.

Les inductances de fuites l_1 et l_2 correspondent, pour la plus grande partie, à des flux individuels de phases, avec seulement une très petite portion combinée sous la forme de champs tournants ; aussi les considère-t-on souvent comme des inductances non cycliques.

L'inductance $\mathcal{N}_1$ de Boucherot se comporte à ce point de vue d'une façon assez spéciale. Elle renferme une inductance de fuites de l'enroulement 1, qui est pour la plus grande partie non cyclique, et une partie $l \dfrac{\lambda \mathcal{M}}{\mathcal{L}_2}$ qui correspond au flux tournant nécessaire pour déterminer le flux non cyclique de fuites de l'enroulement 2.

10° *Emploi des diverses inductances de fuites (partielles ou totales) dans les calculs électrotechniques.*

De ce fait que l'inductance de fuites totales $\mathfrak{N}$ est d'une définition et d'une mesure plus précises que les inductances partielles, il ne faudrait cependant pas conclure qu'elle est la seule qui intervienne dans le fonctionnement des machines et qu'elle puisse suffire à l'étude correcte de leur fonctionnement.

C'est évidemment cette inductance que l'on détermine dans les essais en court-circuit des *transformateurs* et des *machines alimentées en courant alternatif ou primaire*. Mais la caractéristique en déwatté de Potier ou l'essai en court-circuit *permanent* des alternateurs donnent, abstraction faite d'une petite erreur due à l'excès de saturation pour la première, l'inductance partielle de fuites l_2 de l'induit et non l'inductance totale de fuites $\mathfrak{N}_2$ de cet induit, comme le prétendent certains auteurs ; par contre, dans le régime transitoire de mise en court-circuit, c'est bien l'inductance totale de fuites $\mathfrak{N}$ qui intervient.

Dans les divers fonctionnements en charge des machines alimentées en courant alternatif ou primaire, on peut utiliser les inductances $\mathfrak{N}$, avec une approximation pratique souvent aussi bonne que celle que donnerait l'emploi des inductances partielles l, à cause du manque de précision de la définition de ces dernières, mais en toute rigueur, on introduit ainsi une erreur systématique provenant de ce que l'inductance $\mathfrak{N}$ est définie pour le rapport strict des courants primaire et secondaire en court-circuit, tandis que le rapport des courants réels n'étant pas généralement le même, la combinaison correcte des inductances partielles l_1 et l_2 à employer serait différente de celle qui représente l'inductance $\mathfrak{N}$.

OBSERVATIONS DE M. DARRIEUS

M. Darrieus considère que la définition des coefficients de fuites N_1 et N_2 de M. Boucherot par l'expression $(L_1 - N_1)L_2 = M^2$, comme cas particulier de $(L_1 - l_1)(L_2 - l_2) = M^2$, est artificielle, et ne met pas en évidence leur signification physique d'inductance résiduelle d'un circuit en présence de l'autre mis en court-circuit. Ces coefficients

$$N_1 = \frac{L_1L_2 - M^2}{L_2}, \qquad N_2 = \frac{L_1L_2 - M^2}{L_1}$$

s'introduisent au contraire tout naturellement, en même temps qu'un troisième associé,

$$P = \frac{L_1L_2 - M^2}{M},$$

lorsque l'on exprime, non plus les flux en fonction des courants, mais réciproquement les courants en fonction des flux, comme il convient de le faire, par exemple dans l'étude des régimes transitoires, ou toutes les fois que les tensions alternatives associées aux flux correspondants figurent parmi les données.

$$\begin{cases} i_1 = \dfrac{1}{N_1}\varnothing_1 - \dfrac{1}{P}\varnothing_2 \\ i_2 = -\dfrac{1}{P}\varnothing_2 + \dfrac{1}{N_2}\varnothing_2 \end{cases}$$

Ces coefficients s'introduisent encore avec la même signification physique simple qui permet d'écrire les équations immédiatement sans calcul algébrique, lorsque les données consistent, non plus en les deux courants ou les deux flux, mais en un courant et un flux (fonctionnement du transformateur...) par exemple :

$$\varnothing_1 = N_1i_1 + \frac{M}{L_2}\varnothing_2$$

$$i_2 = -\frac{M}{L_2}i_1 + \frac{1}{L_2}\varnothing_2.$$

M. Darrieus sans vouloir attacher trop d'importance à la notion de section commune, croît néanmoins possible de la retrouver, même dans le cas de la figure 3 soulevé par M. Liénard.

OBSERVATIONS SUR LA NOTE DE M. MAUDUIT

Sur la définition, la signification physique et l'emploi en électrotechnique des diverses inductances relatives à deux enroulements (1).

par M. P. Bunet.

1° Les observations suivantes sont relatives aux inductances de fuites totales et partielles. Prenons le cas simple de transformateurs. Les inductances totales de Boucherot, ramenées à l'un des circuits sont :

$$N_1 = L_1 - \frac{M^2}{L_2} \qquad \text{et} \qquad N_2 = L_2 - \frac{M^2}{L_1}.$$

D'autre part, l'essai de court-circuit donne une inductance de dispersion totale l. En fait, quand on exécute l'essai en alimentant l'un ou l'autre circuit, le second étant fermé sur lui-même, dans tous les transformateurs d'emploi courant, on trouve le même l des deux façons, avec une précision de l'ordre des mesures mêmes (Nous supposons qu'on ramène toujours à de mêmes nombres de spires). Il n'y a donc pas lieu de mettre d'indices, et les termes l_1 et l_2 employés par certains auteurs, comme M. Mauduit dans sa note, ne correspondent pas du tout à une distinction basée sur une différence obtenue entre les deux essais de court-circuit.

2° En considérant un transformateur avec courant primaire i_0 pour la circulation de son flux, et, en sus, mêmes courants primaire et secondaire i résultant de la fermeture du secondaire :

$$L_1 \frac{di}{dt} - M \frac{di}{dt} + r_1 i = u_1 - \lambda \frac{di_0}{dt} - r_1 i_0$$

$$- L_2 \frac{di}{dt} + M \frac{di}{dt} - r_2 i = Zi = u_2,$$

où L_1 et L_2 sont les self-inductances totales internes du transformateur et M l'inductance mutuelle ; Z est l'impédance externe secondaire.

On peut transformer cela en adoptant une manière de faire analogue à celle, plus recommandable, adoptée par M. Mauduit dans ses

---

(1) Communication présentée à la séance de la 1re section le 8 janvier 1931.

ouvrages et cours, r étant la résistance totale et l l'inductance totale de fuites résultant de l'essai de court-circuit :

$$u_1 - u_2 = ri + l\frac{di}{dt} + \lambda\frac{di_0}{dt} + r_1 i_0$$

traduction, du reste, du diagramme classique.

Cela nous donne $l = L_1 + L_2 - 2M$, c'est-à-dire une expression à première vue assez différente des N de Boucherot.

Mais, en réalité, nous supposons implicitement que $L_1 = L_2 = L$ c'est-à-dire que le flux total se ferme entièrement par le fer à très peu près, la différence de perméance des flux dans l'air, parallèles à celui dans le fer, étant négligeable quand on considère successivement les circuits 1 ou 2.

Alors $N_1 = N_2 = N$ et $\begin{cases} N = L - \dfrac{M^2}{L} \\ l = 2(L - M). \end{cases}$

Cette dernière équation, écrite $M = L - \frac{l}{2}$, nous donne

$$M^2 = L^2 - Ll = L(L - l)$$

en négligeant $\frac{l^2}{4}$, ce qui est légitime car L est généralement de l'ordre de 500 fois plus grand que l (si le courant à vide est $\frac{1}{a_1}$ du courant normal et la tension de court-circuit $\frac{1}{a_2}$ de la tension normale, on a $L = a_1 a_2 l$). On justifie ainsi $N = l$.

Dans les transformateurs, il est certainement meilleur de garder la forme l et non pas N, car elle débarrasse de L et M qui ont des définitions et des valeurs discutables dès que la saturation apparaît. L'inductance l au contraire se rapporte à un flux extrêmement peu affecté par des questions de saturation ; il a l'avantage qu'on le voit aisément d'une manière nette.

3° Remarquons que, dans le cas de cylindres concentriques longs, sans noyau de fer, de mêmes nombres de spires et même longueur

$$L_1 = \frac{4\pi m^2 S_1}{h} \quad \text{et} \quad L_2 = \frac{4\pi m^2 S_2}{h}.$$

Si le cylindre 2 est intérieur $M = \frac{4\pi m^2 S_2}{h}$. D'où il résulte

$$N_1 = \frac{4\pi m^2}{h}(S_1 - S_2), \qquad N_2 = \frac{4\pi m^2}{h}(S_1 - S_2)\frac{S_2}{S_1}$$

soit $N_1 = N_2 \frac{S_1}{S_2}$.

Mais s'il y a un noyau de fer, cela n'est plus vrai; les sections à introduire sont de la forme $S = \mu S_{fer} + S_{air}$, avec μ de l'ordre de 500 et au delà. C'est ce qui amène à $N_1 = N_2 = N = l$ dans le cas des transformateurs.

4° On peut voir dans certaines publications relatives à des transformateurs spéciaux, comme les fours à induction, que l'on conserve L_1, L_2 et M jusqu'à la fin du calcul (contrairement à ce que j'ai fait dans l'exposé paru dans notre bulletin de septembre 1928) en indiquant de prendre, par exemple, (je cite un auteur) L par la formule de Nagoaka, et M par une de celles de Maxwell. Or, ces formules résultent toutes de développements en séries d'expressions inextricables, établies moyennant certaines hypothèses, donnant donc L et M avec une certaine approximation. Mais il n'en résulte pas du tout que $L - M$ ou $L - \frac{M^2}{L}$ qui finalement subsistent seuls quoi que l'on fasse, soient déterminés avec une précision suffisante; il faut que L et M proviennent de formules établies rigoureusement avec les mêmes hypothèses.

Dans les transformateurs industriels de nos distributions, si l'on a $\frac{l}{L} = \frac{1}{500}$, il vient $M = 0{,}999L$. Si l'on détermine L et M tous deux à $\frac{1}{2\,000}$ près, ce qui est une approximation que beaucoup de formules ne donnent pas, $L - M$ peut être affecté d'erreurs égales à plusieurs fois sa valeur exacte, et N aussi très sensiblement affecté dans sa précision.

En calculant l, les constructeurs de transformateur ne font intervenir, et ils ont donc raison, ni L ni M; ils écrivent que le flux de dispersion d'un transformateur à colonnes, par exemple, est $\frac{4\pi mi}{h + \varepsilon} mS$ en faisant entrer dans S la section annulaire entre enroulements, plus une partie de la section des enroulements (correspondant à $\frac{1}{3}$ ou $\frac{1}{6}$ de l'épaisseur des enroulements selon les cas); h est la hauteur commune des bobines. On admet ainsi, ce qui est près de la vérité, comme le montre l'essai de court-circuit, que, alors que pour un cylindre seul de rayon R

il faut avoir $\frac{h}{R}$ très grand pour qu'une telle formule s'appliqu bien, il suffit, dans le cas de deux enroulements concentrique forces magnétisantes égales, d'avoir $\frac{h}{R_1 - R_2}$ grand.

5° Au lieu d'écrire $l = 2(L - M)$ afin de nous conformer au de ceux qui gardent L_1 et L_2, nous pourront écrire :

$$l = L_1 + L_2 - 2M = (L_1 - M) + (L_2 - M) = l_1 + l_2.$$

Ce sont ces expressions de l_1 et l_2 soit $(L_1 - M)$ et $(L_2 - M$ rappelle M. Mauduit $\left(\text{ramenées à } \frac{m_1}{m_2} = 1\right)$.

Nous pensons que cette définition de l_1 et l_2 et cette division d tout à fait inutiles et qu'elles ne reposent sur rien de précis si et M ne le sont pas eux-mêmes.

Une question se pose : ces inductances l_1 et l_2, composante sont-elles, comme cette dernière, relative à des flux presque ment, pratiquement tout entiers, dans l'air ? Il faudrait voir peut aussi les exprimer au moyen de quantités non affectées phènomènes de saturation et d'hystérésis. Nous allons essa arriver.

Prenons d'abord deux enroulements concentriques constit des solénoïdes extrêmement longs; alors on peut poser M = $l_2 = 0$, $l_1 = l$. Dans ce cas extrême théorique, la division deux n'a aucune signification.

Si l'on admettait que l_1 et l_2 sont comme l, à extrêmement p indépendants de la saturation du noyau, et même de sa prés nous suffirait de prendre les formules classiques de L et M sar de fer, déterminés tous deux de la même façon, ou plutôt d directement le calcul à la détermination directe de L — M. L donnée par Havelock (qu'on appelle maintenant du nom de qui en a modifié la présentation), nous semble conduire à des particulièrement simples. Les deux enroulements 1 et 2 s bobines minces, réduites pour le calcul à leur couche moye application de la règle du tiers de l'épaisseur. La hauteur h c mune et supposée plusieurs fois a. Les deux enroulements sont au même nombre de spires m.

$$l_1 = L_1 - M = 4\pi^2 a^2 \frac{m^2}{h}\left[\left(\frac{A^2}{a^2} - 1\right) + \frac{A}{h}\left(1 - \frac{8}{3\pi}\frac{A^2}{a^2}\right)\right.$$

$$+ \frac{1}{2}\frac{A^2}{h^2}\left(\frac{A^2}{a^2} - 1\right) - \frac{1}{8}\frac{a}{h}\left(\frac{a}{A} + \frac{1}{8}\frac{a^3}{A^3}\right) + \frac{1}{8}\frac{A^4}{h^4}\left(1 + \frac{a^2}{A^2} - 2\frac{A^2}{a^2}\right.$$

$$l_2 = L_2 - M = 4\pi^2 a^2 \frac{m^2}{h} \left[\frac{A}{h} - \frac{8}{3\pi} \frac{a}{h} - \frac{1}{8} \frac{a^2}{Ah} - \frac{1}{64} \frac{a^4}{A^3 h} - \frac{1}{2} \frac{A^2 - a^2}{h^2} + \frac{1}{8} \frac{A^4}{h^4} \left(1 + \frac{a^2}{A^2} - 2 \frac{a^4}{A^4}\right) + \cdots \right]$$

Ceci montre tout de suite que pour $\frac{m}{h}$ donné, si h est extrêmement

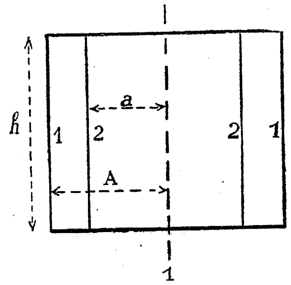


Fig. 1.

grand, $l_2 = L_2 - M = 0$. Mais dès que h diminue, l_2 augmente par introduction de termes assez voisins de $\frac{A - a}{h}$ pour leur somme.

Ces formules parmettent d'obtenir l_1 et l_2 tels que les définit M. Maurduit (à part l'influence dû noyau de fer) et leur somme $l_1 + l_2$ doit être égale à l des formules classiques et de l'essai en court-circuit.

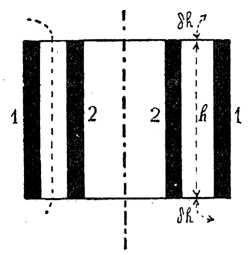


Fig. 2.

Prenons, par exemple, $A = 20$ cm ; $a = 15$ cm ; $h = 50$ cm. Nous obtiendrons

$$l_1 = 0{,}600 . 4\pi^2 a^2 \frac{m^2}{h}$$

$$l_2 = 0{,}084 . 4\pi^2 a^2 \frac{m^2}{h}$$

$$l = l_1 + l_2 = 0{,}684 . 4\pi^2 a^2 \frac{m^2}{h} .$$

Si nous calculons l directement par la formule classique

$$l = 4\pi \frac{m}{h + 2\delta h} m\left(2\pi \frac{A + a}{2}\right)(A - a) = \frac{4\pi^2 m^2}{h + 2\delta h} (A^2 - a^2,$$

avec δh la longueur à ajouter à la hauteur pour obtenir la longueur totale fictive des lignes de force jusqu'à l'espace de nulle reluctance nous trouvons $\delta h = 3{,}2$ cm., ce qui entre bien dans ce qui est ordinairement admis.

Prenons deux bobines de mêmes rayons, mais plus courtes $h = 40$ cm. On trouve :

$$l_1 = 0{,}541 \; 4\pi^2 a^2 \frac{m^2}{h}$$

$$l_2 = 0{,}099 . 4\pi^2 a^2 \frac{m^2}{h}$$

$$l = l_1 + l_2 = 0{,}64 . 4\pi^2 a^2 \frac{m^2}{h}$$

qui amène à $\delta h = 4$ cm.

Prenons deux bobines de mêmes rayons, mais plus longues : $h = 66{,}67$ cm. On trouve :

$$l_1 = 0{,}653 \; 4\pi^2 a^2 \frac{m^2}{h}$$

$$l_2 = 0{,}067 . 4\pi^2 a^2 \frac{m^2}{h}$$

$$l = l_1 + l_2 = 0{,}72 . 4\pi^2 a \frac{m^2}{h}$$

qui amène à $\delta h = 2{,}6$ cm.

En résumé, toujours avec $A = 20$ cm et $a = 15$ cm, on a :

h	$l_1 : l$	$l_2 : l$	$l_1 : l_2$
40	0,845	0,155	5,5
50	0,875	0,125	7,0
66,67	0,907	0,093	9,7

l_2 serait donc peu important par rapport à l_1 sauf pour les colonnes de faible hauteur.

Mais il faut tenir compte de la présence de fer, qui détermine un flux de fuite dans l'air, dont une partie passe dans l'espace entre les bobines 1 et 2 (figure 3). Ce flux augmente l_2 déterminé sans fer selon la figure 5 et il diminue l_1 déterminé sans fer selon la figure 4, admis respectivement comme $L_2 - M$ et $L_1 - M$. Le rapport $l_1 : l_2$ diminue donc.

Les inductances λ donnant avec le courant à vide des chutes de tension $\lambda \omega i_0$, dont nous avons parlé lors des discussions de novembre, sont bien, ainsi que M. Mauduit le fait observer, les l_1 et l_2 ci-dessus, modifiés par la présence du noyau.

6° Les flux de fuite de la figure 3 sont affectés par la saturation; ils ne restent pas sinusoïdaux à cause des variations cycliques de la réluctance du noyau. Ces variations se reportent sur l_1 et l_2 qui ne restent

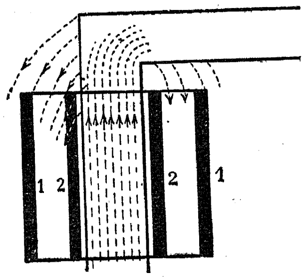


Fig. 3.

plus en dehors des questions de saturation et d'hystérésis dont leur somme l est exempte.

Ces flux de la figure 3 n'ont pas besoin d'être une partie importante du flux total pour changer complètement les valeurs de l_1 et l_2 calculées

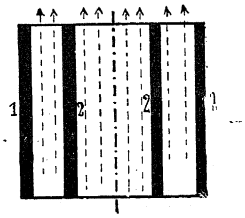


Fig. 4.

comme s'il n'y avait pas de noyau de fer. Cela tient à la petitesse de l_1 et l_2 à côté de l'inductance totale L.

Appelons φ_1, φ_2 les flux de fuite entre enroulements des figures 4 et 5, et φ_3 un flux de dispersion selon la figure 3 pénétrant entre les enroulements, tous les trois pour le même courant d'excitation. Supposons que nous calculions comme ci-dessus, le rapport $l_1 : l_2$ sans tenir compte du fer, que nous ayons trouvé 6 pour ce rapport, et admettons que notre flux φ_3 qui s'ajoute à φ_2 et se retranche de φ_1, amène $l_1 : l_2$ à la valeur 2,5 (plus conforme à ce que l'on observe par l'essai direct des rapports des chutes de tension à vide en alimentant par 1 puis par 2) ; nous tirerons de là le rapport $\frac{\varphi_3}{\Phi}$ (Φ étant le flux total dans le noyau de fer) en connaissant $\frac{l}{L}$, soit par exemple $\frac{1}{500}$.

On obtient ainsi la valeur $\frac{\varphi_3}{\Phi} = \frac{1}{3\,500}$.

Donc, en résumé, dans le cas des enroulements concentriques simples, il est préférable de s'en tenir à la notion de l, qui équivaut à celle des N de Boucherot, mais qui débarrasse des inductances totales, de l'influence de la saturation, de l'hystérésis. Cette inductance l, calculée aisément, mesurée facilement par l'essai de court-circuit, permet d'obtenir la chute de tension secondaire par un diagramme ou un calcul bien connus.

La correction due au courant à vide, où interviennent l_1 ou l_2 est la même à toutes charges; elle est généralement faible.

La séparation de l en l_1 et l_2 ne peut se faire sans introduire à nouveau des questions de saturation. Elle est donc à éviter autant qu'on le pourra.

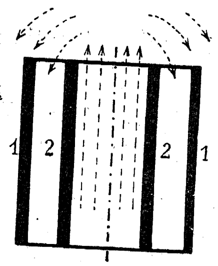


Fig. 5.

7° Avec certains modes de construction il peut en être autrement. Si les deux enroulements offrent l'un par rapport à l'autre une symétrie parfaite (enroulements alternés à nombreux étages) il est bien évident qu'on peut décomposer l avec $l_1 = l_2$ mais cela n'apporte rien de nouveau.

Le dédoublement de l'enroulement 2, par exemple, en deux moitiés, l'une à l'intérieur, l'autre à l'extérieur de 1, conduit à $L_1 - M$ et $L_2 - M$ très voisins; ils ne s'écartent qu'à cause des rayons un peu différents des espaces entre enroulements. La dispersion du genre de la figure 3 agit peu et pour changer l_1 et l_2 qui restent assez voisins de la moitié de l.

8° Dans les machines tournantes, on ne peut obtenir une telle simplification faisant disparaître des calculs importants les inductances totales. Des flux de fuites plus ou moins nombreux, indépendants les uns des autres, empruntent passage dans le fer sur un parcours plus ou moins grand. On ne peut alors espérer que des approximations, toujours discutables ou à peu près, plus ou moins éloignées de la vérité. Mais nous sommes réduits à nous en contenter.

OBSERVATIONS DE M. LIENARD

Sur la communication de M. Mauduit, à la séance du 12 mars de la 1re Section.

1° Signification physique des diverses inductances de deux spires.

Considérons deux spires planes parallèles, AB, CD qui pourront être, soit des spires circulaires centrées sur l'axe XY du plan de la figure 1, soit des spires constituées par deux fils indéfinis normaux au

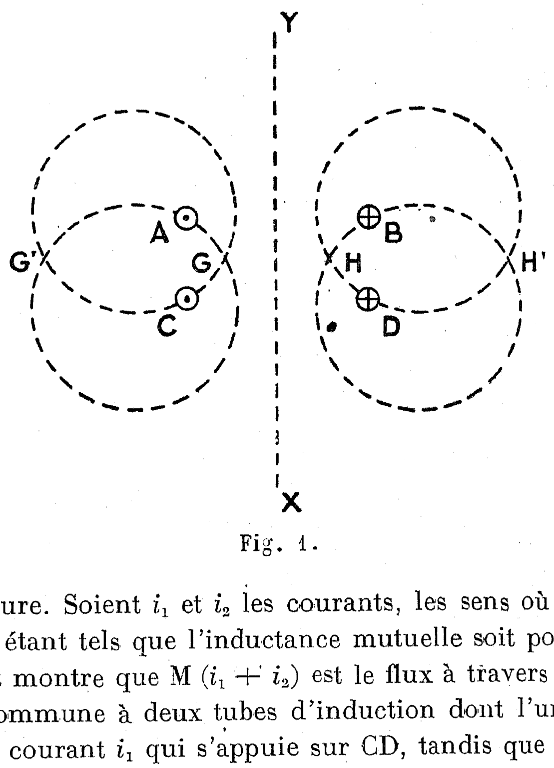


Fig. 1.

plan de la figure. Soient i_1 et i_2 les courants, les sens où les courants sont comptés étant tels que l'inductance mutuelle soit positive.

M. Mauduit montre que M $(i_1 + i_2)$ est le flux à travers une certaine section GH commune à deux tubes d'induction dont l'un est le tube du champ du courant i_1 qui s'appuie sur CD, tandis que le second est le tube du champ de i_2 qui passe par AB.

C'est parfaitement exact : mais la section GH ainsi déterminée n'est pas la seule qui possède la propriété d'être traversée par le flux

$$M (i_1 + i_2).$$

D'abord, dans le cas envisagé, la construction de M. Mauduit donne

une seconde solution G'H', mais en outre il y a toujours une infinité de sections possédant la même propriété. Il suffit que le contour de la section choisie possède une inductance mutuelle égale à M en grandeur et en signe aussi bien avec le circuit AB qu'avec DC, ce qui peut être réalité d'une infinité de manières (1)

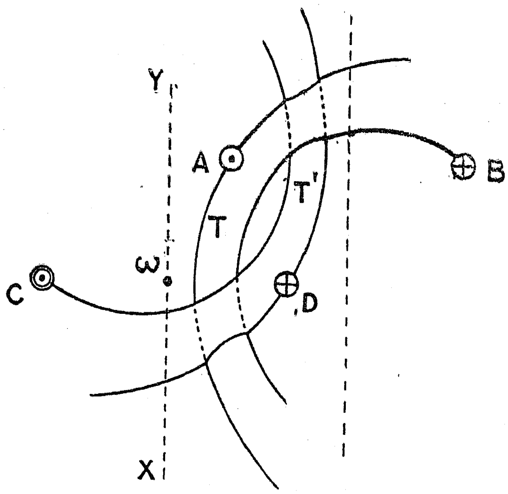


Fig. 2.

Le fait qu'il y a une infinité d'aires S possédant la même propriété que GH d'être traversées par un flux M $(i_1 + i_2)$ diminue déjà beaucoup l'intérêt de considérer cette section commune à deux tubes de force. Ce qui le diminue encore c'est que, très souvent, il n'y aura

(1) Voici comment on peut opérer pour trouver une aire S dont le contour présente l'inductance mutuelle désirée avec AB et CD.

Soient $\mathcal{B}_1$ et $\mathcal{B}_2$ les inductions produites par des courants unité, circulant respectivement en AB, et en CD, de telle sorte que l'induction totale due à l'existence simultanée des courants i_1 et i_2 soit égale à la somme vectorielle $i_1\mathcal{B}_1 + i_2\mathcal{B}_2$.

Considérons un champ égal à la différence $\mathcal{B}_1 - \mathcal{B}_2$ et considérons des tubes de force de ce champ. Toute aire S formée par une portion de la surface d'un tube de force est traversée par un flux nul, d'après les propriétés des lignes de force.

$$\text{flux à travers S de } (\mathcal{B}_1 - \mathcal{B}_2) = 0$$

ou

$$\text{flux}_s\, \mathcal{B}_1 = \text{flux}_s\, \mathcal{B}_2.$$

Soit K la valeur commune. L'ensemble des courants i_1 et i_2 enverra à travers S le flux

$$i_1 \,\text{flux}_s\, \mathcal{B}_1 + i_2 \,\text{flux}_s\, \mathcal{B}_2 = \text{K}(i_1 + i_2).$$

Il n'y a plus qu'à s'arranger pour que K soit égal à M, ce que l'on pourra obtenir en faisant varier l'aire S prise sur le tube de force (au besoin, on prendrait une bobine à plusieurs spires suivant chacune le contour de S).

D'autres solutions en nombre infini pourraient encore être imaginées mais il est sans intérêt de les connaître toutes. Les indications contenues dans cette note n'ont pas été données en séance.

pas de section commune, tout au moins dans le sens ordinaire du mot.

Considérons deux conducteurs circulaires AB, CD dont les axes sont parallèles mais non coïncidant (fig. 2). Soit T le tube de force du champ de CD qui s'appuie sur le cercle AB. Toutes les lignes de force de ce tube sont dans des plans passant par l'axe XY de CD et elles se projettent sur le plan CD suivant des droites issues de son centre ω. Le tube T est donc beaucoup plus étroit dans le voisinage de la traversée du plan CD que dans le voisinage de AB. C'est l'inverse pour le tube T'. Et cette circonstance permet que les deux tubes se transpercent latéralement sans présenter pour cela aucune section commune à travers laquelle passerait le flux $M(i_1 + i_2)$ (1).

2° Emploi des diverses inductances de fuites, partielles et totales.

M. Mauduit indique que le courant *permanent* de court-circuit d'un alternateur dépend de l'inductance partielle de fuite l_2 de l'induit et non de l'inductance totale $\mathfrak{N}$. Il est partiellement exact que le courant permanent de court-circuit ne dépend pas de VC, mais cela ne veut pas dire qu'il dépende de l_2. L'expression de ce courant est en effet

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \frac{M\omega J}{\sqrt{R_2^2 + L_2^2\omega^2}},$$

expression où M est l'inductance mutuelle maxmia entre l'inducteur parcouru par le courant J, et l'induit, de résistance R_2 et d'inductance L_2. Et l'on ne voit pas apparaître dans cette expression le coefficient l_2 égal à

$$L_2 - \frac{m_2}{m_1} M.$$

(1) M. Darrieus m'a fait remarquer depuis la séance que l'on arrivait même dans ce cas à imaginer une section commune traversée par le flux $M(i_1 + i_2)$. Mais cette section, formée de deux aires Σ et Σ' traversées l'une par le flux Mi_1, l'autre par le flux Mi_2, ne mérite guère au point de vue physique le nom de section commune.

LA SOUDURE ÉLECTRIQUE (1)

par M. Marcel MATHIEU.

SOMMAIRE.

A. — *Préambule.*

B. — *Alimentation en énergie d'un poste de soudure en général.*
1° Obtention du courant monophasé.
2° Obtention du courant continu.
3° Obtention du courant diphasé.

C. — *Les procédés de soudure électrique.*
a) Soudure par résistance.
b) Soudure par étincelles.
c) Soudure à l'arc.
d) Soudure à l'arc dans l'hydrogène.
e) Conclusion.

D. — *Les machines à souder par résistance.*
a) Etudes sur la soudure de deux pièces de fer en bout.
1° Remarques sur le chauffage d'une tige de fer.
2° Recherche d'une caractéristique d'une machine à souder en bout.
b) Caractéristique d'une machine à souder par points.
c) La machine à souder considérée comme un transformateur.
d) L'agencement mécanique des machines à souder par résistance.
1° Transformateur.
2° Electrodes et porte-électrodes.
3° Système mécanique de rapprochement des électrodes.
4° Système interrupteur du courant primaire.
5° Bâti et carter.
6° Machines spéciales.
e) Les machines à souder par résistance à réglage automatique.
1° Les principes du réglage automatique.
2° Obtention du réglage automatique des machines à souder par résistance.
3° Exemples de réalisation de réglage automatique.
4° Les machines à souder entièrement automatiques.

E. — *Les machines à souder par percussion Westinghouse.*

F. — *La soudure à l'arc.*
a) L'arc de soudure électrique.
1° Energie dégagée à l'électrode négative de l'arc en courant continu.
2° Densité de courant admise dans les électrodes.
3° Consommation d'électrodes.
4° Choix de l'intensité de courant.
5° Longueur de l'arc.
6° Les précautions à prendre contre contre l'arc de soudure.
b) Les génératrices pour la soudure à l'arc.
1° Définition de la puissance d'une génératrice pour soudure.
2° Caractéristiques des génératrices pour soudure.
3° Exemple d'une génératrice pour soudure.
c) La soudure à l'arc automatique.
d) L'arc de soudure alternatif et polyphasé.

---

(1) Ce rapport sera présenté à la séance de novembre de la 3e Section et discuté à la Semaine de discussion de novembre 1931.

G. — *Les réalisations de la soudure électrique.*
a) La soudure par résistance.
1° Comparaison de la résistance des points de soudure et des rivets.
2° Soudure de métaux divers : cuivre rouge, laiton, aluminium, zinc, tôle galvanisée.
3° Soudure de deux métaux différents.
4° Les travaux exécutés à l'aide de la soudure par résistance.
b) La soudure à l'arc.
1° Application de la soudure à l'arc dans les réparations de pièces mécaniques.
2° Application de la soudure à l'arc, dans la construction mécanique et électrique.
3° Application de la soudure à l'arc dans la construction métallique.
4° Application de la soudure à l'arc dans les constructions navales.
c) Le contrôle des soudures.
H. — *Conclusion.*

A. — Préambule.

Il peut sembler difficile de faire un exposé sur la soudure électrique en général ; nous avons cependant pensé, en dépit de la diversité des machines et des principes utilisés en soudure électrique, à considérer la soudure électrique dans sa généralité en laissant le soin aux différents spécialistes d'exposer certains sujets de la soudure par résistance ou de la soudure à l'arc.

L'énergie électrique est fournie à l'industriel sous forme de courants triphasés, à part de très rares exceptions.

Les machines à souder par résistance sont des machines à courant alternatif monophasé. La soudure à l'arc utilise, soit du courant continu soit du courant alternatif et, dans ce cas, le courant monophasé est toujours le plus fréquent.

On voit donc qu'il y a là une certaine analogie : il faut obtenir du courant monophasé en partant des courants triphasés, et c'est pourquoi nous pouvons utilement parler de l'alimentation des postes de soudure en général.

D'autre part, si l'on examine l'opération de la soudure des métaux en elle-même, on constate une certaine continuité apparente des procédés en partant de la soudure par résistance pour arriver à la soudure à l'arc.

Telles sont les principales raisons de notre essai d'exposer ce sujet dans sa généralité.

B. — Alimentation en énergie d'un poste de soudure en général.

L'industriel dispose, le plus couramment, de courants triphasés, et la machine à souder lui demande :

1° du courant monophasé (soudure par résistance et soudure à l'arc monophasé).

2° du courant continu (soudure à l'arc en courant continu).

3° du courant diphasé (soudure à l'arc à électrodes sandwichs).

Nous allons examiner les solutions possibles dans les 3 cas.

1° *Obtention du courant monophasé.*

Si l'installation est importante, la machine peut utiliser une phase de la distribution triphasée.

La répartition des machines sur les trois phases, peut se faire comme on répartit les charges monophasées d'éclairage dans une distribution triphasée.

Dans ce cas on peut utiliser directement, le courant d'une phase, ou bien, par l'intermédiaire d'un transformateur monophasé. (En réalité il y a toujours un transformateur monophasé, soit dans la machine à souder par résistance, soit pour obtenir la tension convenable de l'arc).

Supposons maintenant que l'importance de l'installation ne permette pas de brancher la machine sur une seule phase : il faut obtenir le courant monophasé en partant du courant triphasé.

Le seul moyen est alors l'emploi d'un groupe moteur-générateur : moteur asynchrone triphasé entraînant un alternateur monophasé, ou d'un système tournant équivalent.

A ce sujet, nous croyons très utile d'insister pour essayer de combattre une erreur encore répandue : nous voulons dire l'emploi d'un transformateur statique triphasé-monophasé.

Le transformateur statique triphasé-monophasé est une hérésie électrotechnique, puisque son fonctionnement n'est correct que dans la marche à vide.

Le problème de la transformation statique d'un système polyphasé en un autre, de nombre de phases différent, a été traité par Potier, et nous ne pouvons pas mieux faire que de répéter le texte du rapport de Potier au Congrès International de physique en 1900 :

« Si l'on veut d'une manière générale transformer un système de « courants triphasés en un système à q phases, on emploiera la formule :

$$\frac{2}{3}\left[\sin\alpha\sin\omega t+\sin\left(\alpha-\frac{\pi}{3}\right)\sin\left(\omega t-\frac{\pi}{3}\right)\right.$$
$$\left.+\sin\left(\alpha-\frac{2\pi}{3}\right)\sin\left(\omega t-\frac{2\pi}{3}\right)\right]=\cos(\omega t-\alpha)$$

« c'est-à-dire que chaque circuit secondaire comprendra ($s \sin \alpha$) tours
« sur un noyau, $\left[s \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{3}\right)\right]$ sur un second, $\left[s \sin\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right)\right]$
« sur un troisième, l'angle α augmentant de $\frac{2\pi}{q}$ quand on passe
« au circuit suivant. M. LEBLANC a usé de ce moyen dans ses trans-
« formateurs redresseurs qu'il adjoint à un collecteur ».

On peut appliquer ce principe à la transformation du triphasé en diphasé.

Les deux tensions du diphasé sont décalées de 90°

On a donc : $\alpha = 0$ pour une phase

et : $\alpha = 90°$ pour l'autre phase

Ce qui donne pour la première phase : (avec $\alpha = 0$)
sur un noyau A :

$$s \sin \alpha = s \sin 0 = 0 \text{ spire.}$$

sur un noyau B :

$$s\left[\sin\left(\alpha - \frac{\pi}{3}\right)\right] = s \sin(-60°) = \frac{-s\sqrt{3}}{2} \text{ spires.}$$

sur un noyau C :

$$s\left[\sin\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right)\right] = s \sin\left(-120°\right) = \frac{-s\sqrt{3}}{2} \text{ spires.}$$

et pour la deuxième phase : (avec $\alpha = 90°$)
sur un noyau A :

$$s \sin \alpha = s \sin 90° = s \text{ spires.}$$

sur un noyau B :

$$s \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{3}\right) = s \sin 30° = \frac{s}{2} \text{ spires.}$$

sur un noyau C :

$$s \sin\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) = s \sin(-30°) = -\frac{s}{2} \text{ spires.}$$

Ce montage porte le nom de Leblanc.

Voici donc que l'on peut arriver à obtenir du diphasé en partant du triphasé avec cette méthode générale, mais comment arriver à une solution si l'on veut obtenir du monophasé ?

Il n'y a pas de solution.

Cependant beaucoup d'inventeurs ont essayé de construire des transformateurs statiques triphasé-monophasé, en faisant des combinaisons de bobinage et malgré leur désir, les essais en charge ont

toujours montré que le primaire n'était pas équilibré et que l'appareil absorbait une quantité d'énergie réactive considérable.

Parmi les constructeurs de machines à souder par résistance ou à l'arc, on en trouve encore aujourd'hui qui proposent le transformateur statique triphasé monophasé. S'ils sont de bonne foi, nous espérons que notre rapport les fera réfléchir ; s'ils agissent selon un désir commercial en vue de faire plus facilement des affaires, nous pensons qu'ils font fausse route, et que leur intérêt serait de renseigner exactement leur client ; cela est d'autant plus facile, que l'intérêt du client n'est pas seulement dans un prix d'achat réduit d'un matériel, mais aussi dans la réduction de ses frais d'exploitation.

Après l'examen des documents que nous avons pu rassembler sur la soudure électrique, nous avons éprouvé le besoin de signaler cette hérésie électrotechnique et d'affirmer encore que seul, le groupe convertisseur tournant est la véritable solution de la transformation du triphasé en monophasé.

2° — *Obtention du courant continu.*

Les arcs de soudure à courant continu sont alimentés par des génératrices spéciales. Dans tous les cas on aura un groupe : moteur générateur.

On a également utilisé des batteries d'accumulateurs.

3° *Obtention du courant diphasé.*

Dans le cas de la soudure à l'arc diphasé, l'alimentation peut se faire par un transformateur statique triphasé-diphasé, montage Leblanc, comme nous venons d'en montrer le principe.

Comme le transformateur Scott (diphasé-triphasé) est réversible, il peut être également employé.

C. — Les procédés de soudure électrique.

On peut diviser les procédés de soudure électrique en deux catégories :

1° Soudure sans métal d'apport (soudure par résistance ou par étincelles).

2° Soudure avec métal d'apport (soudure à l'arc).

a) *Soudure par résistance.*

La soudure par résistance est le procédé qui consiste à utiliser l'effet Joule comme source de chaleur. Il est évident que cet effet Joule peut théoriquement être produit de beaucoup de manières ; citons, par exemple :

1° Par courant continu passant dans les deux pièces à souder.

2° Par courant alternatif de fréquence industrielle passant dans les deux pièces à souder.

3° Par courant alternatif de fréquence élevée passant dans les deux pièces à souder.

4° Par courant alternatif à haute fréquence, induit dans les pièces à souder.

5° Par le procédé électrolytique (signalé par M. Languepin dans son rapport sur « La soudure électrique » présenté à la Semaine de Discussions d'octobre 1927).

L'emploi du courant continu, théoriquement possible, n'est pas pratique à cause de la nécessité d'opérer avec des courants relativement intenses. En effet, il est beaucoup plus simple d'opérer avec le courant alternatif dont la transformation facile permet d'obtenir les intensités considérables utilisées dans la soudure par résistance.

L'emploi de courant alternatif de fréquence élevée, passant dans les pièces à souder, n'est pas réellement utilisé, mais on peut y rattacher le procédé par percussion Westinghouse. Ce procédé utilise la décharge de condensateurs entre les parties à souder qui sont mises en contact brusquement. Ce procédé est assez limité, et il n'est pratique que pour la soudure de petites pièces.

Quant à l'utilisation des courants induits à haute fréquence dans les pièces à souder, elle semble encore bien difficile et le rendement de l'installation apparaît actuellement comme assez désastreux.

Le procédé électrolytique n'a pas reçu non plus de consécration pratique en ce qui concerne la soudure électrique.

En résumé, le procédé soudure par résistance le plus répandu est le procédé Thomson où les pièces à souder font partie d'un circuit secondaire d'un transformateur monophasé et leur chauffage est produit par l'effet Joule dû au courant alternatif monophasé de fréquence industrielle qui les traverse.

Le procédé Thomson de soudure par résistance a été décrit dans le rapport de M. Languepin que nous avons déjà cité, rappelons qu'il est

appliqué pour la soudure de pièces par bouts, par recouvrement, par points et pour la soudure suivant une ligne continue.

M. Languepin a également donné les conditions pour obtenir une bonne soudure :

1° Contact des pièces avant le passage du courant.

2° Etablissement du courant qui fait chauffer les parties à souder.

3° Pression énergique des deux pièces lorsque le métal est chaud.

La soudure dépend de la température et de la pression des pièces. Pour produire une soudure, il faut dépenser une certaine énergie ; on conçoit donc que cette énergie est la somme de l'énergie calorifique fournie aux pièces, et de l'énergie dépensée par l'action de les rapprocher pour obtenir la pression nécessaire. Nous reviendrons sur ce point dans un paragraphe suivant.

b) *Soudure par étincelles.*

La soudure dite par étincelles ou par projection, s'exécute sur des machines semblables à celles par résistance. Elle constitue, d'ailleurs, un mode opératoire un peu différent, mais dont les résultats pratiques sont fort intéressants.

Au lieu de mettre d'abord les deux pièces en contact et d'établir le courant ensuite, on met les deux pièces sous tension, puis on les rapproche doucement : il se forme une série d'arcs qui jaillissent entre les points saillants des deux pièces. Ces points chauffent très rapidement, on continue à rapprocher les pièces doucement, les étincelles continuent à jaillir en gerbe régulière; le métal s'échauffe régulièrement et on termine l'opération par une compression brusque des pièces.

Ce procédé nécessite évidemment une tension secondaire plus élevée que le procédé par résistance.

Il y a une perte de métal, une partie étant volatilisée, mais ce procédé est pratiquement très intéressant, parce qu'il permet de souder des pièces par bout sans que les extrémités à souder soient dressées. (Au contraire, les aspérités des extrémités sont très favorables à ce procédé). Enfin les impuretés se trouvent naturellement rejetées dans le bourrelet qui est toujours faible et facile à enlever.

Dans le *Bulletin de la soudure électrique*, publié par M. Languepin, on signale une installation qui pulvérise 70 kilogrammes de métal par jour, et on fait remarquer que « ce chiffre est très faible par rapport au poids « des pièces soudées dans le même temps par ces machines,

et est à peine supérieur à ce qu'aurait nécessité le refoulement de la soudure par résistance (N° 3, août-septembre 1928).

Nous avons donc examiné la soudure par résistance, et nous arrivons un procédé par étincelles qui est, avec le procédé par percussion, un ommencement de soudure à l'arc, les pièces à souder elles-mêmes ɔrmant électrodes. Nous allons maintenant parler de la soudure à arc proprement dit.

c) *La soudure à l'arc.*

Nous ne ferons pas l'historique de la soudure à l'arc et nous nous ɔntenterons de rappeler que les premières soudures à l'arc se faisaient vec des électrodes de carbone, la chaleur de l'arc faisait fondre ne tige de métal d'apport; puis on opéra avec des électrodes métalques qui fournissaient elles mêmes le métal d'apport.

On sait que dans ces procédés, l'oxydation du métal d'apport était ɔnsidérable et on déposait en réalité un métal très oxydé.

Un progrès important est dû à KJELLBERG; il est réalisé par l'emploi électrodes métalliques enduites de matières non conductrices et peu sibles. Avec ces électrodes on arrive à diriger l'arc et à déposer un étal plus sain.

On conçoit que la matière d'enrobage des électrodes peut jouer le le de fondant, de décapant, elle peut modifier les qualités du métal :posé. En un mot l'arc de soudure est un véritable four électromé-llurgique et on peut y produire toutes sortes d'opérations métallurques en choisissant convenablement la matière d'enrobage.

Les électrodes enrobées permettent l'usage du courant alternatif rce que la volatilisation des matières d'enrobage à l'endroit de l'arc rme des vapeurs qui stabilise l'arc en permettant l'allumage de rc.

d) *La soudure à l'arc dans l'hydrogène.*

M. BRILLIÉ dans son rapport sur « l'arc électrique de soudure » prénté à la semaine d'octobre 1927, a énoncé les principes des procédés ıngmuir et Alexander.

Le procédé Langmuir est un chalumeau électrique : un arc jaillisnt entre électrodes de tungstène est traversé par un courant d'hydro-:ne; il y a dissociation de l'hydrogène et recombinaison de l'hydro-:ne atomique. Cette dernière réaction produit une température plus evée que la température de l'arc lui-même. Enfin l'atmosphère

d'hydrogène protège la pièce contre les oxydations et permet des tensions d'arc plus grandes que l'air.

Le procédé Alexander est différent du précédent, c'est un arc de soudure ordinaire dans un jet d'hydrogène.

e) *Conclusion.*

Les différents procédés pratiques de soudure électrique que nous venons d'énumérer peuvent se mettre sous forme de tableau comme ci-dessous :

	Procédé	Principe	Remarques
Sans métal d'apport	par résistance Thomson	chauffage par effet Joule	éviter les étincelles entre les pièces
	par étincelle	chauffage par effet Joule	produire les étincelles entre les pièces
	par percussion Westinghouse	chauffage par effet Joule	décharge oscillante de condensateurs
Avec métal d'apport	à l'arc	fusion du métal d'apport dans l'arc (électrodes en carbone)	arc entre-pièce et électrode
		fusion de l'électrode métallique (électrodes enrobées)	arc entre-pièce et électrode de métal d'apport
	à l'arc dans l'hydrogène	LANGMUIR. Chaleur de combinaison de l'hydrogène atomique)	arc entre 2 électrodes de tungstène
		ALEXANDER	arc entre pièce et électrode dans courant d'hydrogène

D. — LES MACHINES A SOUDER PAR RÉSISTANCE.

a) *Etudes sur la soudure de deux pièces de fer en bout.*

1°. — *Remarques sur le chauffage d'une tige de fer.* — Considérons d'abord le cas de deux tiges de fer qu'il faut souder bout à bout.

En principe un courant alternatif à 50 périodes par seconde va produire l'effet Joule qui fournira aux extrémités des deux tiges la chaleur nécessaire à la soudure.

Le problème du passage d'un courant alternatif dans un conducteur magnétique est connu, nous allons en appliquer les conclusions dans le cas particulier de la soudure par résistance.

ait que tout se passe comme si on avait un tube de diamètre
ır égal à celui du conducteur et dont l'épaisseur serait :

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{2\pi\mu c\omega}}.$$

e est la valeur de cette épaisseur fictive dans le cas de la soudure
stance?

est variable; lorsque les pièces sont froides, elle a une valeur
née, puis, lorsque la température s'élève, la conductibilité
e, on a :

$$c = \frac{1}{\rho_0 (1 + \alpha\theta)},$$

une raison pour que ε augmente en même temps que la tem-
e θ.

us, les propriétés magnétiques varient avec la température et
nnulent à partir du point de Curie.

inutile d'étudier le phénomène du chauffage d'une barre de
effet Joule produit par du courant à 50 p:s, dans toute sa
té ; dans le cas présent, il suffit de considérer les deux cas

roid ;

haud (au-dessus du point de Curie). A froid, on a pour le fer
stivité d'environ 10 microhms-centimètres.

rméabilité est fonction du champ magnétique.

amp magnétique a pour valeur :

$$H = \frac{0,4I}{d}.$$

gauss.

ısité en ampères.

nètre de la tige en centimètres.

a soudure par résistance, cette valeur de H est de l'ordre de :
près les courbes de magnétisme, la perméabilité magnétique
ndante sera de l'ordre de 50.

sseur réellement utilisée par le courant sera :

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{2\pi\mu c\omega}},$$

timètres, avec :

$$\omega = 2\pi \times 50,$$
$$\mu = 50,$$
$$c = 10^{-4},$$

ce qui donne

$$\varepsilon = \frac{1}{\pi} = 0{,}32 \text{ cm.}$$

On peut donc dire que dans les premières fractions de seconde de l'opération de la soudure en bout, le courant alternatif utilise un peu plus de 3 millimètres d'épaisseur, le long du périmètre extérieur des pièces à souder.

Au-dessus du point de Curie, le fer n'étant plus magnétique, on a : $\mu = 1$ mais la résistivité a augmenté, on a à peu près à 1 000° C :

$$\rho_\theta = 10(1 + 1\,000 \times 0{,}0042),$$

soit environ $\rho_\theta = 50$ microhms-cm.

En reportant ces valeurs dans la formule donnant ε, on a :

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{\frac{2\pi \times 2\pi 50}{50\,000}}} = 3{,}20 \text{ cm.}$$

ε est devenue dix fois plus grande qu'au début. Ce résultat montre que si l'on avait une barre de fer de plus de 64 mm de diamètre, le courant n'utiliserait pas la partie centrale, même à 1 000° C.

En réalité, cela ne constitue pas une impossibilité de souder par résistance des barres de fer de plus de 64 mm de diamètre parce que le fer chauffe par conduction calorifique et la masse entière se trouve chauffée presque uniformément.

D'ailleurs remarquons que la soudure de barres de fer de 70 mm de diamètre, par exemple, nécessite une machine absorbant une puissance de 120 kW et la soudure dure 3 minutes. Ce temps est suffisant pour permettre l'échauffement par conduction calorifique.

Ces considérations expliquent, en partie, que l'énergie dépensée pour les soudures des grosses sections est relativement plus grande que celle dépensée pour les soudures des petites sections.

Section totale en mm²	Diamètre des barres en mm	Durée d'une soudure en secondes	Energie totale dépensée par une soudure en kWh	Energie dépensée par mm² en Wh
150	13,8	8	0,01	0,067
300	19,5	20	0,05	0,167
500	25,2	40	0,15	0,300
1 000	35,7	60	0,40	0,400
2 000	50,5	90	1,00	0,500
3 000	62	120	2,40	0,800
4 000	80	180	4,80	1,200

Nous reproduisons ci-dessus, un tableau que la maison Brandt et Fouilleret a bien voulu nous communiquer, et sur lequel nous avons indiqué la quantité d'énergie dépensée pour la soudure de 1 mm² de soudure dans chaque cas.

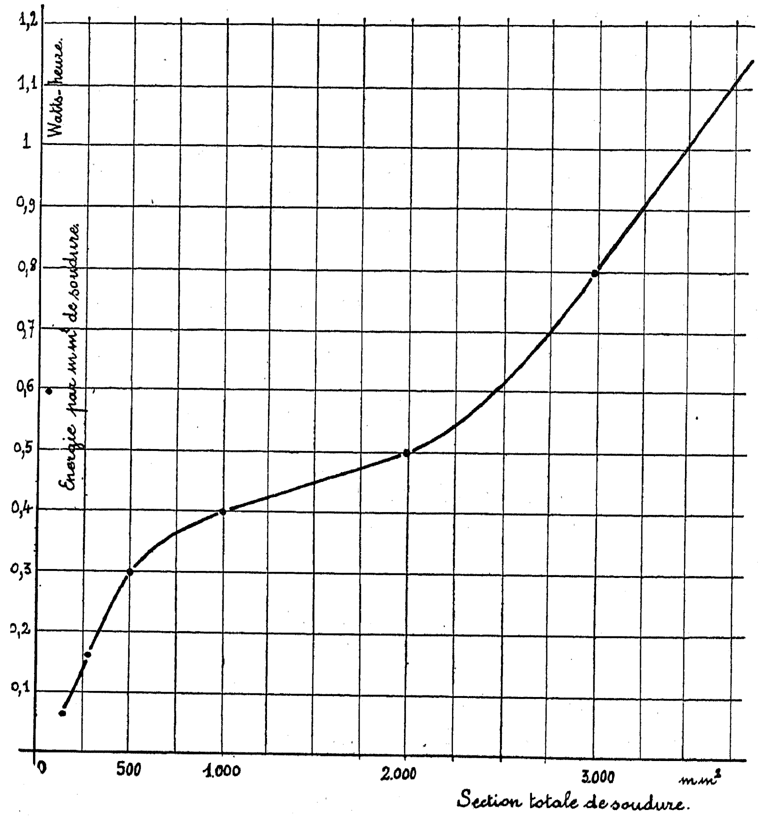


Fig. 1.

Ce tableau montre l'augmentation relative de l'énergie dépensée par unité de section soudée en fonction de cette section ; la courbe de la figure est encore plus instructive. Elle montre, en effet, l'accroissement rapide de l'énergie dépensée par unité de section à partir des sections de l'ordre de 2 500 mm², ce qui correspond à un diamètre de l'ordre de celui que nous avons trouvé précédemment.

2° *Recherche d'une caractéristique d'une machine à souder en bout.* — Dans un essai de définition des machines à souder, que nous avons présenté à la Semaine de Discussions d'octobre 1928, nous avions ramené le phénomène complexe de la soudure en bout de barres de fer, à un phénomène fictif plus simple, en supposant que tout se passe

comme si l'on avait à chauffer une longueur l de barre de la température ordinaire jusqu'à la fusion et cela, sans aucune perte extérieure de chaleur.

En se reportant aux résultats expérimentaux, nous avions remarqué que la longueur de barre à chauffer pour dépenser la même énergie que pour une soudure est :

$$l = aS^{\alpha}$$

ou

$$l = bd^{2\alpha}$$

l = longueur fictive,
S = section des barres,
d = diamètre des barres,
a, b et α étant des constantes.

Dans ces conditions, nous avions trouvé que l'énergie dépensée pour une soudure est de la forme :

$$C = AS^{(\alpha+1)} \quad (1)$$

ou

$$C = Bd^{2(\alpha+1)} \quad (1')$$

et que la puissance nécessaire pour faire une soudure est en kilowatts :

$$P = 6,1 \frac{aS^{(\alpha+1)}}{t} \quad (2)$$

ou

$$P = 4,6 \frac{bd^{2(\alpha+1)}}{t} \quad (2')$$

t étant la durée d'une opération.

De là, nous étions arrivés à la condition :

$$\frac{nS^{2(\alpha+1)}}{t} = \text{Constante} \quad (3)$$

ou

$$\frac{nd^{4(\alpha+1)}}{t} = \text{Constante} \quad (3')$$

qui relient les trois quantités :
n, nombre de soudures à l'heure,
S, section des barres,
ou d, diamètre des barres,
t, durée d'une soudure,
pour une machine donnée.

Il devenait donc facile de chercher les régimes d'opérations différentes qu'une même machine pouvait effectuer, et nous avons même proposé un graphique triangulaire logarithmique donnant immédiatement les solutions.

Les solutions obtenues en tenant compte seulement des relations (3) ou (3') ne sont pas toutes possibles, il faut les vérifier en tenant compte des conditions thermiques du transformateur de la machine.

Pour passer des relations (2) ou (2') aux relations (3) ou (3') nous avions admis que :

$$P^2nt = 3.600P_c^2 = \text{constante}.$$

P_c étant la puissance en régime permanent qui donnerait à peu près le même échauffement moyen que les n opérations de soudure à l'heure, durant chacune t secondes et absorbant P kilowatts.

On peut faire une critique à notre raisonnement d'alors, parce que la puissance P n'est certainement pas constante dans toute la durée d'une soudure.

Mais en supposant que P varie de P_1 à P_2 linéairement soit, par exemple, de :

$$P_1 = p$$

à

$$P_2 = 4p,$$

le calcul montre que l'on aurait la relation ;

$$7np^2t = 3.600P_c^2,$$

tandis qu'en prenant la puissance moyenne pendant la soudure, soit ;

$$P = 2{,}5p,$$

on aurait eu

$$6{,}25np^2t = 3.600P_c^2.$$

On voit que cette variation de P durant le temps de la soudure n'a pour conséquence que de modifier la constante numérique de nos formules.

En conséquence, nous pouvons dire qu'une machine peut être caractérisée par la puissance P_c (puissance de régime permanent du transformateur).

Cela semble d'abord évident *à priori*, mais les calculs que nous avons faits permettent de relier cette valeur aux valeurs définissant un régime de fonctionnement : S ou d, n et t.

Admettons donc les formules (2) ou (2') et :

$$P^2nt = kP_c^2 ;$$

on arrive aux relations suivantes ;

$$\frac{nS^{2(\alpha+1)}}{t} = KP_c^2 = \text{constante} \qquad (4) \equiv (3)$$

ou

$$\frac{nd^{4(\alpha+1)}}{t} = K'P_c^2 = \text{constante} \qquad (4') \equiv (3')$$

Dans ces relations k, K et K′ et sont des constantes pour une même machine :

Pouvons-nous affirmer que les relations (3) ou (4) soient de véritables caractéristiques pour une machine donnée ?

Comme nous l'avons signalé précédemment, une soudure peut se faire suivant certaines conditions de température et de pression des pièces à souder. L'énergie totale pour produire une soudure se compose donc de l'énergie fournie par l'effet Joule et de l'énergie qui produit la compression.

Dans les calculs qui précèdent, seule l'énergie électrique a été comptée, puisque nous sommes partis des puissances électriques absorbées et mesurées pour déterminer la valeur de l :

$$l = aS^{\alpha} = bd^{2\alpha}.$$

Il en résulte que les relations que nous avons établies restent bien des relations caractéristiques d'une machine ; mais en passant d'une machine à une autre les valeurs des coefficients en exposant peuvent varier.

On peut remarquer que la valeur de α se trouve déterminée pour une machine donnée si l'on connaît deux régimes possibles de fonctionnement : en effet α peut se déterminer d'après la relation ;

$$\frac{nS^{2(\alpha+1)}}{t} = \frac{n'S'^{2(\alpha+1)}}{t}$$

ou

$$\frac{nd^{4(\alpha+1)}}{t} = \frac{n'd'^{4(\alpha+1)}}{t'}.$$

Les relations (3) ou (4) sont donc bien des caractéristiques d'une machine à souder en bout.

b) *Caractéristiques d'une machine à souder par points.*

Le raisonnement que nous venons de faire pour la soudure en bout peut être suivi pour la soudure par points.

Dans notre essai de définition des machines à souder, nous avions considéré un phénomène fictif équivalent au phénomène de soudure par points, et nous étions arrivés à la relation suivante :

$$\frac{ne^{\beta}}{t} = K''P_c^2 = \text{Constante.} \qquad (5)$$

n = nombre de soudures à l'heure.
e = épaisseur d'une tôle.
t = durée d'une soudure en secondes.

Pour les mêmes raisons que précédemment, la relation (5) peut être considérée comme caractéristique d'une machine à souder par points.

K″ et α sont des constantes numériques pour une même machine ; elles peuvent prendre des valeurs différentes en passant à une autre machine

c) *La machine à souder considérée comme un transformateur.*

Au point de vue électrique, la machine à souder par résistance est un transformateur dont le primaire n'a le plus souvent qu'une seule spire.

On sait que dans un transformateur on cherche à diminuer le plus possible les fuites entre le primaire et le secondaire, or dans une machine à souder, les formes des pièces à souder obligent à des dispositions qui écartent notablement du primaire une partie de la spire secondaire.

Cette remarque s'applique surtout aux machines à souder par points dont les bras sont assez longs.

Dans le *Bulletin de la Soudure Electrique*, n° 8, de juin 1929, publié par M. LANGUEPIN, on trouve une petite étude relative à cette question : « L'influence de la longueur des bras dans les machines à souder par points ».

Nous rappellerons l'exemple cité dans cet article : Si l'on veut que deux machines travaillent de la même façon, l'une avec des bras de 30 cm de longueur, l'autre avec des bras de 1 mètre, il faudrait théoriquement fournir 42 kVA à la seconde, tandis que 23 kVA suffisent à la première.

En réalité, la puissance à fournir à la seconde serait même encore plus forte à cause d'une augmentation de la self inductance due aux pièces magnétiques qui se trouvent entre les bras.

On ne peut donc songer à faire des machines à souder avec des bras de plusieurs mètres de longueur. On dépasse rarement 1 m 50 de longueur de bras.

Dans le cas où l'on désirerait utiliser un transformateur de machine à souder en plusieurs points, on peut constituer les bras à l'aide de câbles que l'on réunit le plus possible jusqu'au lieu d'utilisation afin de diminuer la section embrassée par la spire secondaire.

Le transformateur de machines à souder est un transformateur à forte intensité secondaire, on est donc conduit à utiliser une importante section de cuivre.

Dans ce cas, on sait qu'il est nécessaire de diviser le cuivre pour

éviter des pertes exagérées par courants de Foucault dans le cuivre. Dans ce but, on utilise des bandes de cuivre de faible épaisseur et on les réunit en parallèle. Les extrémités de cet ensemble sont soudées de façon à former un bloc qui vient apporter le courant sur les électrodes ou les porte-électrodes.

La grande intensité qui passe dans la spire secondaire produit, malgré toutes les précautions, une perte par effet Joule assez importante. D'autre part, les pièces à souder étant portées à une température élevée, les électrodes chauffent par conduction calorifique. Pour augmenter la durée des électrodes, on est souvent obligé de recourir à un refroidissement artificiel. On ne peut pas songer à utiliser une ventilation, parce qu'elle agirait aussi sur les pièces à souder, mais le refroidissement par circulation d'eau dans les électrodes ou les porte-électrodes est une solution assez simple.

Les constructeurs de machines à souder par résistance arrivent à faire des machines dont le facteur de puissance est de 0,6 à 0,8 suivant les travaux effectués. Cette valeur est très convenable pour de telles machines, elles prouvent le soin apporté dans la construction du transformateur.

Les tôles du circuit magnétique ne sont pas de qualité quelconque et le découpage est tel que le circuit ne comporte pas de joint d'air : Les fuites magnétiques du secondaire ne peuvent pas être toutes évitées, et peuvent être importantes, aussi faut-il soigner tous les autres points du transformateur et en particulier le circuit magnétique.

d) *L'agencement mécanique des machines à souder par résistance.*

Une machine à souder par résistance se compose essentiellement :

1° d'un transformateur monophasé formé par un circuit magnétique et un bobinage primaire, et d'une spire secondaire,

2° des électrodes et des porte-électrodes,

3° d'un système mécanique pour le rapprochement des électrodes,

4° d'un système interrupteur du courant primaire,

5° d'un bâti support et du carter de protection, du transformateur et du système interrupteur.

1° *Transformateur.* — Comme nous l'avons déjà indiqué, le circuit magnétique du transformateur est formé par des tôles de qualité convenable et découpées en une seule pièce afin d'éviter les joints d'air.

L'enroulement primaire est placé contre le noyau magnétique et se

trouve divisé de façon à permettre d'utiliser des nombres de spires différents. Ce changement de nombre de spires s'obtient à l'aide d'un commutateur que l'on place convenablement suivant le travail à effectuer.

La partie de la spire secondaire située à l'endroit du transformateur est le plus souvent constituée par des feuilles de cuivre de faible épaisseur ; quelquefois par une sorte de câble.

2° *Electrodes et porte-électrodes.* — Dans les machines à souder par points, les électrodes sont constituées par des pièces en cuivre qui s'emmanchent par une partie conique dans les porte-électrodes formés par les bras.

Les bras de ces machines qui portent les électrodes, sont en cuivre rouge ou en bronze et disposés de façon à permettre une circulation d'eau pour refroidir les électrodes.

Dans les machines à souder en bout, l'agencement mécanique est un peu plus complexe que dans les machines à souder par points. Il est nécessaire de tenir solidement les pièces à souder dans des mâchoires.

La forme des machines est évidemment variable suivant que l'on a à souder des pièces rondes, plates ou de formes quelconques.

Le système de serrage des pièces dans les machines peut être basé sur des principes assez divers, il faut rechercher un dégagement rapide des pièces après soudure et un serrage également rapide des pièces à souder.

Les principes le plus souvent employés pour le serrage des pièces sont :

1° l'excentrique.

2° le levier à genouillère.

3° la vis.

Les pièces de serrage dans les machines à souder en bout ou les bras des machines à souder par points, sont reliés à la spire secondaire par un joint convenablement dressé et largement dimensionné.

Il est évident que l'on doit toujours rechercher à diminuer le nombre des joints dans le circuit secondaire et que ceux qui se présentent doivent être particulièrement soignés.

3° *Système mécanique de rapprochement des électrodes.* — Nous avons vu que la soudure se forme dans certaines conditions de température et de pression. Il faut donc produire un mouvement pour approcher

les pièces à souder l'une de l'autre et le mécanisme doit être tel qu'il permette d'exercer une certaine pression.

Ce mécanisme peut être commandé directement par l'ouvrier ou par un moteur spécial.

Dans le cas de commande directe par l'ouvrier, le mécanisme est essentiellement constitué par des leviers, et la commande se fait par pédale ou par levier à main.

Lorsque la manœuvre des électrodes se fait par moteur, le moyen employé est :

1° La commande pneumatique.

2° La commande hydraulique.

3° La commande par moteur électrique.

Nous citerons, par exemple, les machines à souder par points Sciaky qui sont à commande pneumatique et qui ont pour avantage d'obtenir une pression indépendante de l'ouvrier. En effet, en agissant sur la pédale, l'ouvrier fait fonctionner le distributeur de la commande pneumatique et la pression ne peut pas dépendre de lui.

La commande hydraulique est employée pour les machines de grande puissance.

La commande électrique est employée pour la manœuvre de l'électrode supérieure de machines à souder par points (Brandt et Fouilleret).

4° *Système interrupteur du courant primaire.* — A part le cas de la soudure par étincelles, nous avons vu que le courant devait être établi lorsque les pièces étaient venues en contact.

De même, la rupture de ce courant doit se faire un peu avant la compression finale qui doit produire la soudure.

Ces deux conditions montrent la relation qui existe entre le fonctionnement de l'interrupteur et le mouvement de manœuvre des électrodes dont nous venons de dire un mot.

On conçoit que ces mouvements puissent être en harmonie, et les dispositifs employés sont variables suivant les constructions et les genres de machines à souder.

5° *Bâti et carter.* — Le bâti est le plus souvent un support pour le transformateur et la machine, il peut être en fonte ou même en fer..... soudé à l'arc.

Le carter de protection du transformateur est le plus souvent une simple tôle perforée, pour permettre une ventilation nécessaire au refroidissement des enroulements.

6° *Machines spéciales.* — Il existe un grand nombre de machines à souder spéciales. Parmi ces machines, nous devons citer les machines à souder en ligne et les machines à souder bord à bord des emboutis préparés spécialement.

Dans les machines à souder en ligne, les électrodes des machines à souder par points sont remplacées par des galets entre lesquels viennent rouler les tôles à souder.

Le mouvement de rotation des galets peut être commandé manuellement ou par un moteur électrique d'entraînement. La puissance de ce moteur varie de 0,5 à 1 ch. La vitesse de soudure est de 0,50 à 2 m 50 par minute, suivant les épaisseurs des tôles.

Les machines à souder des emboutis bord à bord sont d'un aspect différent des autres machines; elles ont l'aspect de toupies à travailler le bois. Dans ces machines, l'une des électrodes est constituée par une coquille massive qui s'appuie sur une table et reçoit son courant par cette table, et d'une électrode centrale portant un bourrelet.

Les pièces sont placées dans la coquille massive et les bords à souder sont présentés devant le bourrelet de l'électrode centrale. La soudure se fait en tournant les pièces autour de l'électrode centrale. On soude de cette façon des boutons de porte, des becs de cafetière, des cornets de téléphone, etc...

On pourra se reporter aux croquis et au texte du rapport déjà cité de M. Languepin, pour avoir quelques précisions sur les différentes réalisations de machines à souder par résistance.

e) *Les machines à souder par résistance à réglage automatique.*

1° *Les principes du réglage automatique.* — Dans le but d'obtenir des séries de soudures bien régulières, on a cherché des dispositifs automatiques de rupture du courant au lieu de laisser cette manœuvre sous l'influence de l'ouvrier.

Nous allons examiner les différents principes qui pourraient être utilisés pour obtenir une rupture automatique du courant, sans nous inquiéter des réalisations industrielles.

En premier lieu, il semble logique de limiter le temps de passage du courant. En principe, des soudures identiques doivent s'effectuer dans le même temps.

Pour arriver à ce résultat, on emploiera un relais à temps, réglé pour l'opération de soudure demandée, qui commandera le déclenchement lorsque la durée de passage du courant aura atteint une valeur fixe

Ce système serait parfait si toutes les pièces étaient bien semblables, mais en réalité, il peut y avoir des irrégularités de forme ou d'état de surface des pièces à souder qui déterminent des temps de passage du courant différent un peu du temps moyen.

Mais le temps n'est pas la seule variable dans une opération de soudure, en effet, les quantités variables durant une opération sont :

1° le temps t;

2° le courant primaire i_1;

3° le facteur de puissance primaire : cos φ_1;

4° le courant secondaire : i_2;

5° la tension secondaire (entre électrodes) : u_2;

6° le facteur de puissance secondaire : cos φ_2.

Nous supposons que la tension d'alimentation U_1 primaire est constante, ce qui est presque toujours réalisé.

La variable la plus intéressante est l'intensité secondaire i_2. Nous avons vu que l'épaisseur fictive à compter pour le calcul de la résistance ohmique dans le chauffage d'une tige de fer, varie de 0,32 à 3.2 millimètres lorsque la température passe de la température ordinaire à 1000° C. Il en résulte une variation de résistance, on a, à la température ordinaire :

$$R_0 = \frac{\rho_0 l}{\frac{\pi}{4}(d^2 - (d - 2\varepsilon)^2)} = \text{environ } \frac{\rho_0 l}{\pi d \varepsilon},$$

ou :

$$R_0 = \frac{10.10^{-6} l}{0{,}032\pi}.$$

A 1000 C on aura environ la résistance R′ telle que :

$$R' = \frac{50.10^{-6} l}{0{,}32\pi}.$$

Le rapport de la résistance R′, à 1000 C, à la résistance R_0, à la température ordinaire, est donc de l'ordre de :

$$\frac{R'}{R_0} = \frac{50 \times 0{,}032}{10 \times 0{,}32} = \frac{1}{2}.$$

La variation du courant secondaire sera à peu près inversement proportionnelle à la variation de résistance; on peut donc dire que le courant secondaire variera du simple au double du commencement de l'opération à la fin de l'opération.

En réalité, cette variation du courant secondaire sera relativement encore plus forte, puisque nous n'avons considéré que le cas du chauf-

fage d'une tige par effet Joule, et que nous avons au début une discontinuité (joint) qui augmente la résistance apparente et qu'à la fin de l'opération, les deux pièces présentent une quasi-continuité (juste avant l'action de la pression qui produira la soudure).

Le calcul simple que nous avons fait, montre d'une façon nette, que le courant secondaire augmente depuis le début de l'opération de soudure de pièces de fer jusqu'à la fin.

On peut donc se baser sur cette remarque, d'ailleurs vérifiée par l'expérience, pour régler les opérations de soudure par l'action d'un relais ampèremétrique à maxima qui ferait déclencher lorsque le courant aura atteint une certaine valeur.

En pratique, le courant primaire suit assez fidèlement les variations du courant secondaire, le relais ampèremétrique à maxima peut donc se trouver sur le primaire. Cela évite de placer un transformateur d'intensité sur le circuit secondaire, mais le procédé sera un peu moins précis.

On conçoit que la variation de l'intensité secondaire entraîne une plus ou moins grande chute de la tension secondaire u_2, et on peut, au moins théoriquement, concevoir un réglage par relais voltmétrique sensible, placé sur le secondaire pour commander la rupture du courant.

Enfin une solution qui semble répondre à toutes les objections, réside dans l'utilisation de relais wattmétrique qui compterait la quantité d'énergie électrique réellement fournie et commanderait le déclenchement lorsque la valeur convenable serait atteinte.

On peut donc, théoriquement, utiliser les dispositifs suivants pour la commande automatique de la rupture du courant :

1° Un relais à temps vérifiant la durée d'une opération.

2° Un relais ampèremétrique à maxima { sur le secondaire, sur le primaire.

3° Un relais voltmétrique à minima sur le secondaire.

4° Un relais wattmétrique { sur le secondaire, sur le primaire.

Une combinaison des deux premiers systèmes peut également être envisagée.

Il n'est pas inutile de signaler que pour obtenir de bonnes soudures, il est nécessaire que le réglage automatique du système soit convenable, car on obtiendrait avec régularité de mauvaises soudures, si le réglage n'était pas convenable, et cela est indépendant du principe de commande automatique choisi par le constructeur.

2° *Obtention du réglage automatique des machines à souder par résistance.*

Une machine à souder normale peut exécuter des travaux assez différents, par exemple, une même machine à souder par points peut être utilisée pour souder des épaisseurs totales de fer de 5/10 à 30/10 de millimètres.

Pour passer d'une série d'opérations à une autre, il est nécessaire de régler convenablement la machine.

Les conditions de la soudure sont définies par une pression et une température, ce qui nous conduit à considérer le réglage possible de :

1° la pression des électrodes ;

2° le temps, l'intensité ou la quantité d'énergie absorbée.

Pour régler l'intensité, ce qui est nécessaire pour toutes les machines, même non automatiques, on se servira de la division de l'enroulement primaire ; ce qui revient à changer le rapport de transformation du transformateur.

Ce réglage du rapport de transformation peut être indépendant des autres réglages ; on emploie le plus souvent un commutateur tournant, ou encore un tableau de trous à fiches.

Parmi les machines avec dispositifs de réglage automatique particulièrement pratiques, nous devons citer les machines Sciaky où une seule manette permet de régler les trois facteurs : pression, intensité, durée. Les repères de cette manette sont désignés par l'épaisseur totale à souder. Les dispositifs de réglage automatique adoptés par les constructeurs dépendent surtout du principe de réglage qu'ils ont choisi. En pratique, il y aura un relais à régler dans des positions définies par la nature des opérations désirées.

3° *Exemples de réalisation de réglage automatique :*

a) *Machine à souder par points système Sciaky.* — Le système Sciaky est breveté en France sous le n° 569.733 (9 janvier 1924). Il utilise la remarque suivante : (nous reproduisons un passage du texte du brevet) :

« Il a été observé que pour certains rapports entre la tension de sou-
« dure et la pression des électrodes, le courant passant par le point à
« souder ne dépasse pas une certaine intensité, même si on prolonge
« le passage du courant au delà du temps nécessaire ».

Nous ne décrirons pas le détail du système, nous allons simplement essayer d'en faire comprendre le fonctionnement.

Lorsqu'on exécute une soudure, le mouvement d'un levier vient

d'abord fermer l'interrupteur et, son déplacement continue pour faire remonter un autre levier sur lequel un frein peut agir à la descente.

Le courant établi passe dans un électro-aimant dont l'action d'attraction a pour effet de desserrer le frein du levier qui vient d'être remonté.

L'agencement est tel que le frein est d'autant plus desserré que l'intensité du courant est grande.

Le levier freiné descend plus ou moins vite suivant l'intensité du courant et à la fin de sa course, le jeu brusque d'un ressort provoque la rupture du courant en ouvrant l'interrupteur. L'étincelle de rupture se trouve même soufflée par l'électro-aimant.

Le principe du réglage Sciaky est donc le contrôle de l'intensité combinée avec le temps. La descente du levier est une façon de compter le temps, or ce temps doit varier avec l'intensité et cela s'obtient automatiquement, puisque le mouvement de descente du levier sera de durée variable avec l'intensité qui produit le freinage.

Pour réaliser des soudures différentes (épaisseurs de tôles différentes), on limite la course géométrique du levier à descente freinée.

Le dispositif Sciaky est fort intéressant, cette combinaison du contrôle de l'intensité et du temps permet, en effet, de réaliser de bons points de soudure, même si les points sont rapprochés.

Dans le cas de points de soudure très rapprochés, il existe un courant de dérivation important qui augmente l'intensité et un simple relais ampèremétrique ferait interrompre le courant quelquefois trop tôt, le système Sciaky vient corriger cette imperfection en contrôlant et en combinant ingénieusement les facteurs : intensité et temps.

b) *Machines de l'Electro-Soudure.* — L'Electro-Soudure construit deux genres d'interrupteurs automatiques pour machines à souder par résistance.

L'un deux comporte un relais qui attire une armature dès que le courant est établi. Cette armature se rapproche de l'électro-aimant mais son mouvement est freiné par un piston chassant de l'huile d'un cylindre par un orifice réglable. Lorsque l'armature arrive au collage, un dispositif fait fonctionner l'interrupteur. Le réglage se fait par l'orifice d'échappement d'huile du cylindre.

L'autre système employé par l'Electro-Soudure comporte un relais wattheuremétrique à deux enroulements : l'un de tension branché sur le primaire, l'autre d'intensité alimenté par un transformateur d'intensité sur le primaire.

Lorsque la quantité convenable d'énergie est passée dans ce relais, un contacteur fonctionne en coupant l'alimentation primaire.

4° Les machines à souder par résistance entièrement automatiques.

Les machines à souder par résistance sont des machines d'atelier de construction au même titre que les machines-outils usuelles ; tours, fraiseuses, perceuses ou raboteuses. On conçoit que pour une série d'appareils à fabriquer on agence une machine, ou même, on emploie une machine à souder spéciale pour obtenir un travail entièrement automatique.

A l'automaticité de la rupture et de l'établissement du courant, vient alors s'ajouter l'automaticité des mouvements mécaniques d'arrivée des pièces à souder et d'expulsion des pièces soudées.

Ces machines entièrement automatiques peuvent être très variées suivant les travaux à effectuer.

E. — Les machines a souder par percussion Westinghouse.

Les machines à souder par percussion (procédé Westinghouse) sont limitées dans leurs applications à cause de la batterie de condensateurs qui est nécessaire à leur fonctionnement.

Les pièces à souder sont projetées violemment l'une contre l'autre et la décharge oscillante des condensateurs produit une soudure très rapide.

Cette rapidité permet la soudure de métaux très oxydables au contact de l'air.

Une soudure dure environ 1/100 de seconde.

Les condensateurs sont chargés par une batterie d'accumulateurs.

La Westinghouse Electric et Manufacturing Company construit des machines à percussion pour souder des fils de métal de 1,5 à 3 mm, avec lesquelles un opérateur peut réaliser 200 ou 400 soudures à l'heure suivant son habileté.

F. — La soudure a l'arc.

a) *L'arc de soudure électrique.*

1° *Energie dégagée à l'électrode négative de l'arc en courant continu.* — L'énergie dégagée à l'électrode négative de l'arc est, d'après la Westinghouse, de l'ordre de :

2 600 000 joules par kilogramme d'électrode.

Cette énergie se répartit à peu près de la façon suivante :

Energie utilisée pour liquéfier (2 000° C) : 60 pour cent.

Energie utilisée pour vaporiser (2 450° C) : 26 pour cent.

Pertes par radiation, conduction et convection ; 14 pour cent.

Cette répartition suppose que les 90 pour cent se trouvent liquéfiés et que 10 pour cent se trouvent vaporisés.

2° *Densité de courant admise dans les électrodes.* — Lorsque l'on utilise des électrodes contenant 0,18 pour cent de carbone, la densité de courant peut être comprise entre 11 et 15 A par millimètre carré (de préférence entre 12,5 et 14 A par millimètre carré).

3° *Consommation d'électrodes.* — Pour trouver le poids d'électrodes nécessaires pour effectuer un travail donné, il faut d'abord chercher le poids du métal à déposer, puis le majorer en ajoutant le poids de métal volatilisé et le poids des restes d'électrodes.

Cela conduit à un poids d'électrode consommé de 1,35 fois le poids de métal à déposer.

4° *Choix de l'intensité de courant.* — L'intensité de courant d'arc de soudure est variable avec le diamètre des électrodes qui lui-même varie avec les différents travaux.

Pour la soudure à l'arc de deux tôles, le diamètre des électrodes employées et l'intensité du courant varient avec l'épaisseur des tôles. D'après un graphique de la Westinghouse, les valeurs correspondantes sont les suivantes :

Epaisseur des tôles en mm	Diamètre des électrodes mm	Intensité de courant en ampères	Densité de courant en ampères : mm²
2 à 3	2	50	25,6
3 à 8	3	100	14,2
6 à 12	3,5	125	13,1
9 à 19	4	150	12
12 à 25	4,3	175	12
18 et plus	4,6	200	12

Ces valeurs ne sont pas des données immuables ; il arrive fréquemment, par exemple, que l'on emploie des électrodes de 4 mm de diamètre pour la soudure de tôles de 4 à 20 mm d'épaisseur.

En ce qui concerne la consommation d'énergie, nous reproduisons ci-dessous les résultats de trois essais effectués aux usines Siemens-Schuckert :

Diamètres d'électrodes en mm	3	4	5
Métal fondu en kg.	3,253	0,415	0,665
Métal déposé en kg. . , ...	0,241	0,385	0,605
Pertes de métal en pour 100.	5,0	7,2	9,0
Temps réel de soudure (en minutes). . .	21,75	24,95	26,83
Temps de marche à vide (en minutes). .	6	4,23	4,59
soit en pour 100	27,7	17	17,2
Temps pour déposer un kg de métal (en minutes).	90	64,6	44,4
Consommation d'énergie en kWh pendant la soudure	1,81	2,82	4,03
en kWh à vide.	0,27	0,17	0,23
en kWh pour déposer un kg de métal : (sans compter les pertes à vide). . . .	7,5	7,3	6,7

Il faut faire remarquer que la consommation d'énergie varie avec la méthode de soudure et en particulier avec l'angle du chanfrein des tôles. Pour des tôles de 10 mm d'épaisseur avec des chanfreins tels que l'angle des deux bords inclinés soit de 90°, la consommation d'énergie sera de 5,2 kWh par mètre de soudure, tandis qu'elle ne sera que de 3 kWh si l'angle est de 60°. Cela provient évidemment que dans le premier cas il y a plus de métal à déposer que dans le second.

Enfin il ne faut pas chercher à diminuer la consommation par la réduction excessive du temps de soudure en employant des électrodes de grand diamètre et une forte intensité, parce que pour avoir une bonne soudure, il faut déposer d'abord du métal avec une électrode de petit diamètre et après on peut utiliser des électrodes de diamètre plus important.

En pratique, le diamètre le plus courant des électrodes est de 4 mm.

5° *Longueur de l'arc.* — La condition nécessaire à la soudure est la formation de gouttelettes de métal et pour cela il faut un cratère qui reste toujours très chaud.

La formation des gouttelettes est variable avec la longueur de l'arc : pour un arc court, les gouttelettes sont nombreuses et petites; pour un arc long, elles sont plus rares et plus grosses.

La nature de l'électrode a une grande influence sur la formation des gouttelettes, leur nombre et leur grosseur.

Un bon soudeur doit maintenir la longueur de l'arc bien constante; cela est assez difficile et c'est pourquoi les machines automatiques arrivent à déposer un métal plus sain.

Dans la soudure à l'arc en courant continu, l'électrode est négative.
La tension de l'arc est représentée en général par une fonction de la
ngueur et de l'intensité :

$$U = a + \frac{bl}{I}$$

et b varient avec la nature de l'électrode; pour des électrodes en fer
r on arrive à la relation approchée suivante :

$$U = 11 + \frac{5.500\,l}{I}$$

tant la longueur de l'arc en centimètres, U la tension en volts, et I
ntensité (de l'ordre de 150 A).

Nous reproduisons ci-dessous, les tensions de l'arc de soudure en
ction de la longueur d'arc, données par M. Sarazin dans son livre
: « *La soudure électrique à l'arc* » :

Tensions	Longueur d'arc en cm.
12	0,08 à 0,1
15	0,15
18	0,20
20	0,25
22	0,30
25	0,40

5° *Les précautions à prendre contre l'arc électrique.* — L'arc électrique
et des radiations ultra-violettes et infra-rouges qui blessent les yeux.
est absolument nécessaire que le soudeur et même les visiteurs se
otègent la vue contre ces radiations.

Différents verres ont été étudiés à cet effet.

Enfin, le soudeur doit protéger ses mains à l'aide de gants d'amiante
cuir.

Les postes de soudure doivent être munis d'écrans en tôle peints en
r mat.

b) *Les génératrices pour la soudure à l'arc.*

° *Définition de la puissance d'une génératrice pour soudure.* — La
ssance d'une génératrice est évidemment définie par l'intensité du
rant de soudure et la tension de l'arc.

Pour définir la puissance du moteur, il y a lieu de connaître le

coefficient de travail effectif de soudure et le rendement de la génératrice.

Le moteur peut être un moteur électrique ou un moteur à explosions.

2° *Caractéristiques des génératrices pour soudure.* — Une génératrice pour soudure doit avoir une caractéristique en charge très rapidement tombante et c'est la raison pour laquelle on adopte l'excitation hyper-compound.

Les pertes à vide de la génératrice sont une indication intéressante, mais il faut aussi tenir compte du régime de travail que l'on demandera à la machine.

La génératrice de soudure doit permettre l'emploi d'électrodes nues en fer pur et le travail de soudure au plafond.

Enfin les oscillogrammes d'une génératrice sont des indications utiles, ils indiquent nettement la qualité de stabilité que doit posséder l'arc.

3° *Exemple d'une génératrice pour soudure. Génératrice type « soudure » système Japy frères.* — Le groupe de soudure Japy frères répond aux caractéristiques suivantes :

Tension de l'arc : 25 V.

Intensité débitée en marche « continue » 200 A.
— — bi-horaire 250 A.
— — horaire 280 A.
— — instantanée 300 A.

Tension à vide : 65-70 V.

Vitesse en charge : 1 400 tours par minute.

Il permet l'emploi d'électrodes enrobées spéciales et d'électrodes nues en fer pur.

La génératrice Japy frères est une machine tétrapolaire avec pôles de commutation ; elle est du type anti-compound.

L'excitation shunt assure l'excitation à vide. Elle est fournie par une excitatrice montée en bout d'arbre, munie d'un enroulement, en opposition avec son propre enroulement et alimenté aux bornes d'une self réglable placée en série sur le circuit de l'arc.

Le réglage de l'intensité est obtenu au moyen de deux manettes agissant sur la self réglable et sur le rhéostat d'excitation de l'excitatrice.

Les plots de réglage de la self correspondent à l'utilisation d'électrodes de 2, 4, 3, 6 et 8 millimètres de diamètre.

Nous reproduisons ci-dessous une partie du cahier des charges auquel cette génératrice correspond :

Conditions limites de fonctionnement.

« 1° Le rhéostat de champ étant dans la position du réglage maximum, « la tension à vide du groupe devra être supérieure à 60 V.

« 2° Le groupe débitant, sur une résistance extérieure variable, et le « rhéostat de champ étant maintenu dans une position fixe, il sera pro- « cédé pour chaque position du rhéostat à une caractéristique de la « génératrice.

« Il existe une position du rhéostat pour laquelle l'intensité devra « être inférieure à 55 A ; la tension à vide correspondante sera supé- « rieure à 37 V.

Conditions de stabilité.

« Le rhéostat de champ est placé dans une position telle que le cou « rant débité sera supérieur à 220 A (I maximum).

« 1° On vérifiera en faisant varier la résistance extérieure (Essai « statique) que, pour une tension aux bornes de la dynamo com- « prise entre 10 et 35 V, l'intensité du courant débité restera comprise « entre I maximum et (I maximum — 30 A) = 190 A.

« 2° La résistance extérieure variable étant réglée pour donner une « tension de 30 V, on fera varier cette résistance extérieure, de façon « à faire tomber la tension de 10 V. Les deux positions correspon- « dantes de la résistance extérieure étant notées, on fera varier brus- « quement par manœuvre à main, celle-ci de la partie correspondant « à la tension statique de 30 V à la position correspondant à celle « de 20 V ; la différence maximum entre la pointe de l'intensité obser- « vée et la demi-somme des intensités observées statiquement dans les « deux positions sera de 25 ampères.

« La dynamo ne devra, en aucun cas, se désamorcer sous une ten- « sion statique de 10 V.

« La génératrice devra permettre une chute de tension absolument « automatique entre la mise en charge (amorçage de l'arc) et la « marche normale (entretien de l'arc).

Garanties du groupe de soudure à l'arc :

« Pour un régime de marche répondant aux caractéristiques indi « quées (200 A × 25 V) :

« 1° *Rendement* aux bornes de la génératrice, ou rapport entre la « puissance absorbée et la puissance aux bornes : 54 pour 100.

« 2° *Rendement* à l'arc ou rapport entre la puissance absorbée et la « puissance à l'arc, en admettant une chute de tension de 4 V dans « le câble pour une intensité de 200 A ; 50 pour 100.

« 3° *Puissance absorbée à « vide »* aux différentes tensions assurant la gamme de réglage :

Tension à vide Volts	*Pertes à vide* Watts
55	1 050
60	1 130
65	1 250
70	1 400
75	1 600
80	1 780
85	2 000
90	2 320

c) *La soudure à l'arc automatique.*

Pour certains travaux, on emploie des têtes automatiques de soudure. L'arc est réglé automatiquement par un mécanisme spécial à moteur.

La régularité de l'arc est beaucoup plus parfaite que celle obtenue par le meilleur soudeur manuel et la conséquence est la meilleure qualité de métal déposé.

La soudure automatique est presque toujours employée pour le rechargement des arbres. L'automaticité est complète : réglage de l'arc et rotation de l'arbre.

Les têtes de soudure automatique peuvent également s'utiliser pour la soudure à l'arc semi-automatique dans laquelle les pièces sont déplacées manuellement devant l'arc.

d) *L'arc de soudure alternatif et polyphasé.*

L'emploi d'électrodes enrobées permet d'utiliser l'arc en monophasé.

Le réglage se fait par bobine de self induction ou par transformateur spécial (Sarazin).

Un progrès intéressant serait la réalisation de l'arc polyphasé.

L'arc diphasé est déjà employé. On emploie le diphasé à 3 fils, la pièce étant réunie au pôle commun et les deux électrodes étant parallèles (électrodes sandwichs).

La soudure à l'arc dans l'hydrogène permettra très probablement la réalisation de l'arc triphasé : les trois électrodes étant disposées parallèlement.

Des essais très remarquables ont été faits d'après les idées de MM. Brillié et Béthenod dans les Laboratoires de la Soudure Autogène Française.

G. — Les réalisations de la soudure électrique

a) *La soudure par résistance.*

1° *Comparaison de la résistance des points de soudure et des rivets.* — Si l'on compare la résistance au cisaillement de points de soudure et de rivets, on constate que les points de soudure ont une résistance d'environ 50 pour 100 plus grande que les rivets.

2° *Soudure de métaux divers.* — *Soudure du cuivre rouge.* — Il est possible de souder par points de très faibles épaisseurs de cuivre rouge. La grande conductibilité du cuivre empêche la soudure des tôles de fortes épaisseurs à cause de la difficulté de bien localiser le courant au point de soudure.

La soudure en bout du cuivre rouge est plus facile que la soudure par points, le courant étant obligé de passer au joint à souder.

Soudure du laiton, de l'aluminium, du zinc, de la tôle galvanisée. — Une machine à souder par résistance peut servir à souder le laiton, l'aluminium, le zinc, la tôle galvanisée.

Il faut signaler que l'épaisseur totale de ces métaux que peut souder une machine par points, est beaucoup plus faible que l'épaisseur totale de tôle des fer qu'elle peut souder : elle est de 3 à 4 fois plus petite que cette dernière épaisseur.

3° *Soudure de deux métaux différents.* — Les machines à souder par résistance peuvent souder des métaux de nature différente. On peut ainsi souder une tôle d'acier sur du laiton, mais l'épaisseur totale de l'ensemble qu'il est possible d'obtenir sur une machine à souder par points est environ 7 à 8 fois plus petite que les épaisseurs totales de fer qu'elle peut souder.

Nous citerons le cas très intéressant de la soudure de tige de nickel sur tige de cuivre rouge signalé dans le *Bulletin de la Soudure Electrique*, n° 4 (octobre 1928).

Cette soudure qui demanderait une puissance instantanée considé-

rable par le procédé par résistance, est réalisée facilement à procédé par étincelles. On obtient une sorte de brasure ; un transition se produit et est constituée par un véritable alliage métaux.

4° *Les travaux exécutés à l'aide de la soudure par résistanc* soudure par résistance permet l'exécution d'assemblages par soudure remplaçant les rivets.

Elle est utilisée dans la construction d'objets en tôle que l'c bord à bord, ce qui conduit à des prix de revient beauc réduits que les procédés d'emboutissage et de repoussage.

Les machines à souder en bout sont quelquefois employées machines à forger : elles peuvent servir à exécuter des refoule métal.

Enfin il y a beaucoup d'applications dérivées du procédé Tl par exemple, on peut se servir d'un transformateur de machine pour chauffer les lames de collecteur dans le but d'y sou ailettes. La lame de collecteur est pincée entre deux blocs de qui forme les électrodes, le courant passant dans le cuivre chauffer et l'ailette est placée dans l'encoche.

b) La soudure à l'arc.

1° *Applications de la soudure à l'arc dans les réparations d mécaniques*. — Il faut considérer trois cas de réparations :

1° réparations de pièces mal usinées.

2° réparations de pièces de fonderie présentant des défauts d derie.

3° réparations de pièces de fonderie cassées.

Pour les pièces mal usinées, un arbre tourné à un trop faibl mètre, par exemple, on exécute aux endroits convenables un r gement de métal. La nature de l'électrode ne doit pas être quelc et si la pièce doit être travaillée, il faut éviter de déposer un mét ait des tendances à tremper.

Les réparations des soufflures des pièces de fonte s'exécutent des électrodes de diamètre assez petit, et on mate le dépôt de pendant l'opération. Si la partie réparée doit subir un usinage, or employer des électrodes au nickel, autrement les électrodes en a enrobées sont suffisantes. Ces réparations se font sans réchauffage lable de la pièce de fonte.

Pour réparer des pièces cassées, on peut réunir les morceaux pa

dure à l'arc, ou bien on peut reformer par apport de métal la partie cassée.

La préparation de la soudure de deux pièces ou parties de pièces de fonte consiste en un chanfreinage des bords en V simple pour les petites épaisseurs et en 2 V opposés pour les grandes épaisseurs et en un goujonnage.

Les goujons doivent être posés solidement et à des endroits convenables ; ils ont pour but de tenir le métal d'apport.

Parmi les réparations intéressantes que la soudure électrique à l'arc a permises, citons celle du Pont de Suresnes dont M. LEBRUN, Sous-Directeur de la Soudure Autogène Française a donné une description dans la *Revue Arts et Métiers* d'avril 1929, d'ailleurs accompagnée de plusieurs autres exemples également intéressants.

2° *Application de la soudure à l'arc dans la construction mécanique et électrique.* — La soudure électrique permet d'exécuter des pièces mécaniques de forme quelconque qui, autrement, ne peuvent être obtenues que par la fonderie.

On construit couramment des blocs moteurs de moteurs à explosions entièrement soudés à l'arc. On réalise ainsi une économie de poids fort utile pour les moteurs d'aviation ou d'automobiles et la sécurité n'est pas diminuée, au contraire.

Certains bâtis de machines peuvent être construits à l'aide de la soudure à l'arc. Dans ce cas, on n'a pas besoin de chercher à obtenir la forme de la pièce fondue, une étude spéciale est évidemment plus rationnelle. D'ailleurs on peut gagner beaucoup en matière et en résistance en étudiant spécialement les formes et en plaçant les fers, profilés ou tôles suivant les meilleures conditions de résistance et d'utilisation.

Les Américains ont réalisé des carcasses de machines tournantes en fers profilés soudés à l'arc.

Ces procédés commencent à se répandre en France et en particulier, « le Matériel électrique S.W. » les applique fort heureusement à la construction des alternateurs à axe vertical. L'aspect de la machine est un peu différent de celui de la machine en pièces fondues, mais le poids des pièces est quelquefois diminué de moitié, et la résistance est toujours meilleure parce que l'étude devient facile, et on se trouve libéré des conditions de possibilité de fonderie.

Les applications de la soudure à l'arc semblent s'étendre à toutes les constructions mécaniques, et même au matériel d'artillerie. A ce sujet,

citons qu'un petit affût pour canon antiaérien de trois pouces pèse 263 kg en employant la soudure à l'arc, tandis que le même affût coulé pesait 353 kg environ. Cet avantage de poids n'est pas le seul avantage puisqu'à l'usinage, il fallait rejeter 5 pièces sur 6, sans compter les rebuts de fonderie.

3° *Application de la soudure à l'arc dans la construction métallique.* — L'application de la soudure à l'arc dans la construction métallique conduit à des assemblages plus robustes que les assemblages rivés. Cette considération permet la réduction du poids des ouvrages et en particulier l'emploi des cornières de petites dimensions, puisqu'il n'y a plus de trous de rivets à poinçonner.

On a reproché quelquefois à la soudure électrique de produire des ouvrages un peu déformés. Cela ne doit pas se produire, si le travail est convenablement conduit et ne constitue pas, à notre avis, une objection contre l'application de la soudure à l'arc.

On construit à l'aide de la soudure à l'arc des fermes métalliques, des pylônes ou des éléments de pylônes.

Ce mode de construction peut être appliqué à de grandes constructions, et nous pouvons citer un pont à treillis pour chemin de fer exécuté par la soudure à l'arc par la Westinghouse à Chicopée Falls.

La longueur du pont est de 41 mètres.

Le poids d'acier nécessaire a été de 80 tonnes, c'est-à-dire les 2/3 de celui nécessaire à la construction rivetée du même pont.

4° *Application de la soudure à l'arc dans les constructions navales.* — La question de la soudure électrique dans les constructions navales est assez à l'ordre du jour pour que nous n'ayons pas besoin de nous y étendre.

Nous nous contenterons de citer quelques passages d'un discours de M. Herriot du 15 mars dernier :

« L'Allemagne a mis en chantier et réalisé, grâce à la soudure auto-
« gène, un type de croiseur extrêmement rapide et dont l'allègement
« permet une augmentation extraordinaire d'armements. Actuellement
« aucun croiseur d'aucun pays du monde ne saurait lutter avec lui,
« l'atteindre à la course et résister à ses feux ....
« ....les accords navals conclus avec l'Italie s'inspirent
« des réalisations de l'Allemagne, ce sont des croiseurs imitant ceux
« du type « Amiral Scheer » que ces deux puissances vont construire. »

c) *Le contrôle des soudures.*

Lorsqu'une soudure est bien faite, il y a continuité entre les deux

pièces soudées ; toute discontinuité constitue un défaut (inclusion d'oxydes, criqûres, collage).

Pour constater les défauts d'une soudure, tous les phénomènes basés sur la continuité des propriétés de la matière peuvent, en principe, servir à une méthode de contrôle des soudures.

On peut donc utiliser, en particulier :

1° les propriétés des rayons X,

2° la conduction électrique,

3° la conduction calorifique,

4° les vibrations sonores,

5° la perméance magnétique.

L'emploi des rayons X demande une certaine habitude dans la lecture de la radioscopie. Il est bon, et, il est d'ailleurs très facile, de se repérer à des défauts fictifs connus.

La conduction électrique a été étudiée dans le but de vérifier les soudures, par M. E. A. Sperry. (Voir *La Soudure Electrique à l'Arc*, par R. Sarazin.)

La conduction calorifique n'a pas donné de méthode pratique de contrôle de soudure.

Les vibrations sonores sont des caractéristiques des bonnes ou des mauvaises soudures : lorsqu'on les frappe avec un marteau, le son est différent suivant la qualité de la soudure.

Enfin la perméance magnétique diffère avec la qualité de la soudure et c'est sur ce principe que la méthode du spectre magnétique de M. Roux (de la Soudure Autogène Française) est basée. Cette méthode est, lorsqu'on peut l'employer, celle qui montre l'image la plus nette de la qualité de la soudure.

II. — Conclusion.

Devant le vaste sujet dont nous avons voulu parler, nous avons l'impression de ne l'avoir qu'à peine entrevu. En effet, les phénomènes variés et les applications nombreuses de la soudure électrique font qu'elle devient une véritable technique spéciale et c'est pour cela que l'Office Central de la Soudure Autogène a ouvert une Ecole Supérieure de Soudure (32, boulevard de la Chapelle.)

Nous avons essayé de présenter le sujet sous forme originale en repoussant la compilation inutile et fatigante.

LES MACHINES A SOUDER MODERNES ET LEURS APPLICATIONS (1),

par M. Paul Neumayer,

Ingénieur à la Société Siemens-France.

En principe on distingue deux genres de soudure électrique : La soudure par résistance et la soudure à l'arc.

I. — La soudure par résistance est comparable à la soudure de forge, donc à l'assemblage sous l'action du choc ou de la pression, de pièces

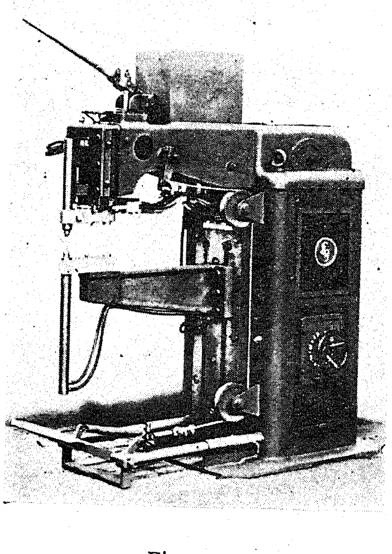


Fig. 1.

chauffées à une température suffisante, tandis que la soudure à l'arc est un procédé de coulée de métal à l'état fluide, provoqué par la chaleur d'un arc électrique.

Les trois genres de soudure par résistance sont :

(1) Cette communication présentée à la séance du 12 juin de la 3e Section sera discutée à la semaine de discussions de novembre 1931.

la soudure par points, la soudure par molettes ou soudure continue, et la soudure en bout.

Le principe est le même partout : les tôles et les profilés sont serrés entre les électrodes qui ferment ainsi le circuit secondaire d'un transformateur monophasé. Ce transformateur sert à abaisser à quelques volts la tension d'un réseau et à produire en même temps la forte intensité nécessaire à l'échauffement des pièces à souder.

1) *Les machines à souder par points* sont généralement commandées à main ou par pédale. Le transformateur et les électrodes sont refroidies

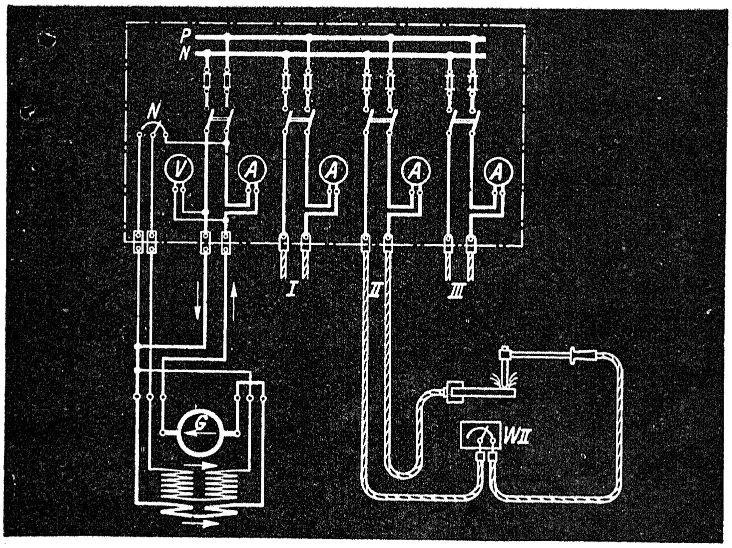


Fig. 2.

par une circulation d'eau ; un régulateur à plusieurs crans, muni d'un volant, permet le réglage instantané de l'intensité de soudure même pendant le travail.

1*a*) Pour la soudure des carrosseries pour automobiles, on peut utiliser des machines à souder par points à *commande automatique* (fig. 1). Elles peuvent faire jusqu'à trois points de soudure par seconde.

1 *b*) Dans une fabrication en grande série portant sur des tôles de même épaisseur, on peut diminuer le pourcentage des déchets en éliminant le facteur humain de la soudure. Ceci est atteint par l'application d'un rupteur automatique électromagnétique sur les machines ordinaires, en interrompant la soudure toujours pour la même quantité de chaleur produite dans le point, réglée d'avance.

2) Il suffit de changer les armatures des machines à souder par points pour les transformer en *machines à soudure continue par molettes*, aussi bien pour la soudure longitudinale que transversale. Ce dispositif permet le réglage de l'avance à l'aide d'un électromoteur et d'une boîte à 9 vitesses. Le pas de la soudure est également réglable suivant le degré d'étanchéité demandée.

3) Les machines modernes pour la soudure en bout doivent permettre l'assemblage, soit par résistance pure, soit par rapprochement, soit par rapprochement à chauffage préalable. Par la résistance pure, on fait

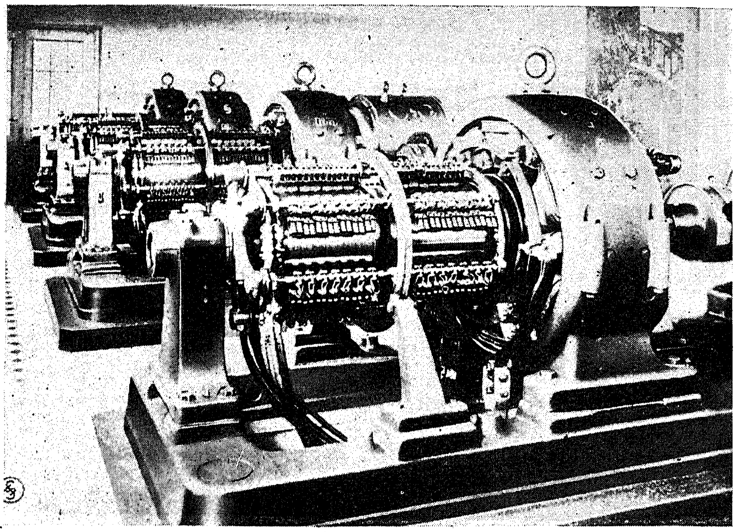


Fig. 3.

toucher les deux bouts à souder, on établit le courant et quand par la résistance du courant électrique de passage les deux bouts sont chauffés à blanc, on les presse l'un contre l'autre ; cela produit un refoulement de métal dans la section soudée. Quand on soude par étincelles, on met d'abord le courant, on fait toucher les pièces un instant et on les éloigne vivement en tirant des arcs d'une faible longueur et d'une forte intensité. Ces arcs font vivement fondre le métal sur la surface des pièces en forme de gouttelettes d'acier, qui se précipitent radialement sous l'influence d'un puissant champ magnétique. Quand la fusion est suffisamment avancée, on presse rapidement les bouts l'un contre l'autre, en coupant en même temps le courant. Les oxydes de fer et les gouttelettes d'acier forment un collier, qu'on enlève facilement sur la pièce refroidie.

Le troisième procédé est la combinaison des deux premiers, soudure par étincelles à chauffage préalable, employé surtout pour des pièces de section importante. La résistance mécanique obtenue par ce dernier procédé est la même dans la soudure que la partie saine. (Un film donne le fonctionnement d'une machine à souder par molettes et d'une machine à souder par étincelles).

II. — Dans la soudure à l'arc, nous distinguons trois procédés :

Le procédé de Benardos où l'on tire un arc électrique entre un charbon et la pièce à souder, et où l'on fait fondre une baguette comme

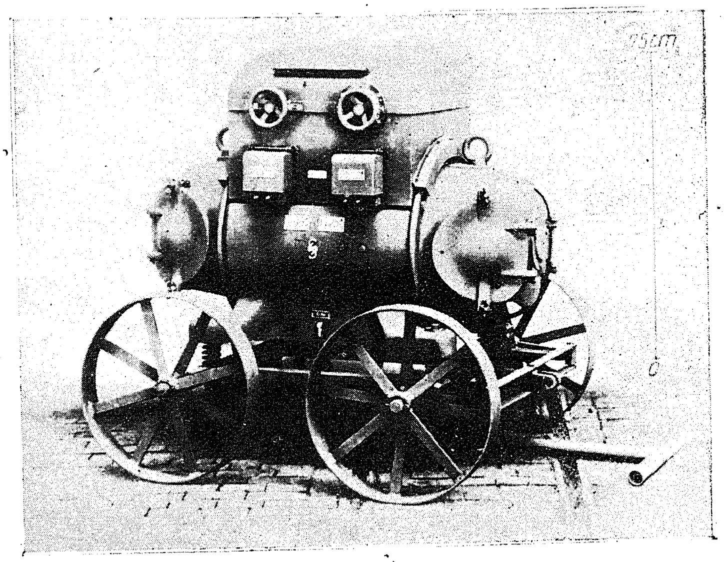


Fig. 4.

métal d'apport pareillement à la soudure à l'acétylène. Ce procédé n'est utilisé que pour les métaux autres que l'acier et la fonte.

Le procédé de Zerener avec un arc électrique tiré entre deux charbons, avec un soufflage magnétique et une baguette comme métal d'apport, est abandonné, parce que trop compliqué.

Le procédé de Slavianoff, le plus connu et universellement utilisé pour la soudure à l'arc sur la fonte et l'acier, emploie la baguette d'apport en même temps pour le tirage de l'arc. L'arc tiré entre la pièce et la baguette fait fondre localement la pièce et en même temps la baguette qui se pose en forme de gouttelettes de métal sur la pièce. La position, le branchement électrique et le serrage des pièces est indif-

férent et en conséquence la soudure à l'arc est d'un emploi plus étendu que la soudure par résistance.

Pour souder à l'arc on a besoin d'un courant électrique d'une caractéristique spéciale. L'arc électrique a une caractéristique tombante, tandis que celle d'une dynamo ordinaire est montante, donc inutilisable pour la soudure. En conséquence, il faut obtenir une caractéristique tombante, utiliser des résistances en combinaison avec un réseau ou une dynamo à tension constante ou disposer d'une génératrice spéciale de soudure qui présente par elle même cette caractéristique.

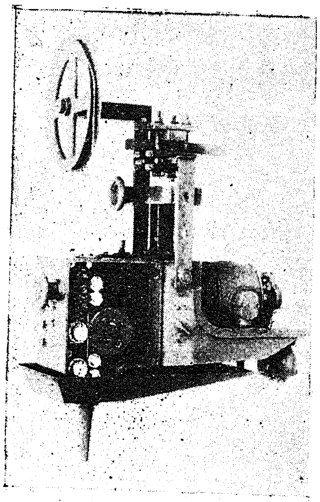


Fig. 5.

1° Voici le schéma du premier cas (fig. 2). Une génératrice G à tension constante alimente des barres omnibus P et N. Sur ces barres on branche par l'intermédiaire des résistances de réglage W_{II} les postes de soudure I, II, III, etc. La chute de tension produite dans les résistances permet de tenir un arc dans de bonnes conditions et d'avoir en même temps une intensité de court-circuit limitée, ce qui est très important. D'autre part la tension à vide est assez élevée pour l'amorçage de l'arc. Le nombre de postes qu'on peut brancher sur une génératrice pareille, dépend de ses dimensions et du coefficient d'utilisation des postes de soudure. Ces génératrices sont généralement des machines compound de manière à ce que la tension initiale commune soit bien constante et indépendante de la charge prise par chacun des postes.

Sur la fig. 3 nous voyons 4 génératrices de ce genre pour 2 000 A chacune. Le groupe complet est composé d'une génératrice accouplée avec

un moteur triphasé à haute tension. Cette installation avec 2 groupes auxiliaires de 500 A et avec 90 groupes individuels, a été réalisée par les Usines Siemens-Schuckert dans un chantier naval allemand. C'est la plus grande centrale de soudure qu'on ait réalisée jusqu'à présent.

2° Revenons aux dynamos de soudure individuelles. Nous avons dit plus haut que ce sont des machines spéciales dont la caractéristique statique s'adapte à la caractéristique tombante exigée par l'arc. La construction de ces machines est très délicate et demande beaucoup d'expérience. Les difficultés de réalisation sont les suivantes :

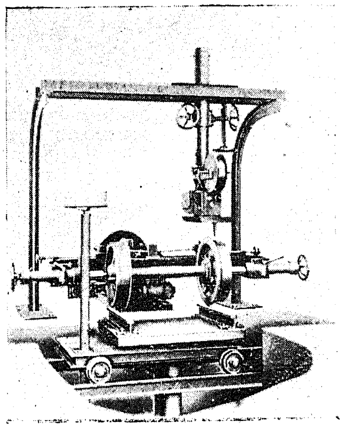


Fig. 6.

Une bonne caractéristique statique, une gamme de réglage étendue sans pertes élevées, une commutation impeccable sur toute la gamme d'utilisation de la machine, des pertes à vide réduites aussi bien à faible qu'à forte excitation, un bon rendement, un coefficient d'utilisation judicieusement choisi, une caractéristique dynamique avantageuse et une exécution mécanique impeccable.

Quand on ne dispose pas de source électrique, on peut utiliser une dynamo de soudure accouplée avec un moteur à essence ou muni d'une poulie pour le branchement sur une transmission. Quand on peut se servir d'un réseau existant, on emploiera de préférence des groupes monocarcasses.

Depuis 1923, l'apparition du premier groupe Siemens de ce genre, le système électrique et le réglage ont été perfectionnés, le poids et l'encombrement réduits, le dispositif pour éviter l'inversion de polarité perfectionné, etc. La fig. 4 représente ce type perfectionné pour le branchement sur un réseau courant continu, monté sur chariot.

Pour la soudure de la fonte à chaud, on a besoin de fortes intensités. Dans ce cas on doit utiliser 2 ou 3 groupes individuels en parallèle ou bien un convertisseur spécial fournissant de 500 à 1 000 A.

3° Le groupe multiple est une application spéciale des groupes indi-

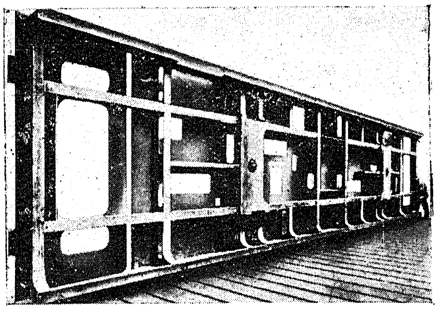


Fig. 7.

viduels. Au point de vue du rendement, il est parfois plus avantageux de faire entraîner plusieurs génératrices par un seul moteur. Na-

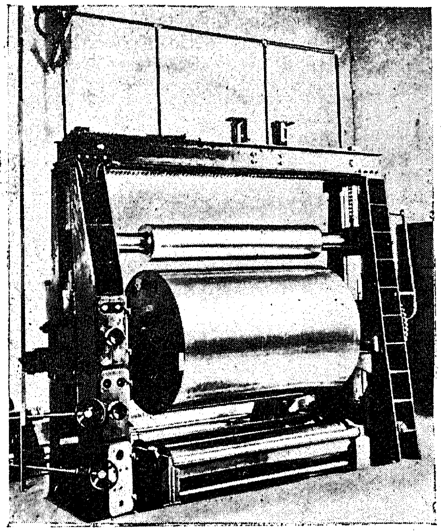


Fig. 8.

turellement ce dispositif n'est économique que lorsque toutes les génératrices travaillent continuellement en pleine charge, comme par exemple, pour plusieurs têtes automatiques de soudure.

4° Les têtes automatiques de soudure (fig. 5) sont employées par-

tout où l'on veut se rendre indépendant des inégalités de la soudure dues au travail humain. Elle permettent d'obtenir une vitesse considérable.

La figure 6 représente le dernier modèle d'une machine automatique pour le rechargement des jantes des roues de wagons et d'automotrices. Les trains de roues sont amenés jusqu'à la hauteur de pointe de la machine. Après avoir serré le train de roues entre les pointes comme sur un tour, on le fait pivoter, afin que la tête automatique puisse souder toujours verticalement. La tête automatique fait avancer le fil de soudure à la cadence du rechargement, en même temps qu'on fait

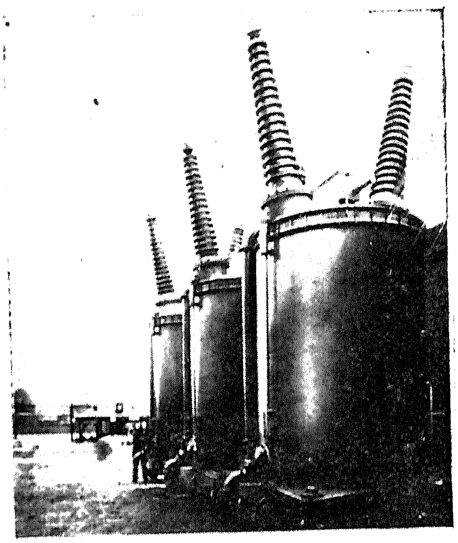


Fig. 9.

tourner le train de roues autour de son axe. Tous ces mouvements, ainsi que le brossage de la pièce rechargée, se font à l'aide de moteurs électriques.

Voyons maintenant quelques résultats pratiques obtenus dans l'industrie :

Une des premières applications au début de la soudure était le remplacement des pièces cassées en fonte par des assemblages soudés en tôle. Par exemple, le bâti d'un balancier d'un ancien modèle cassé a été remplacé par un bâti soudé. Plus tard on a remplacé les pièces en fonte par la construction en acier soudé, plus légère, plus résistante, moins chère et ne nécessitant pas de modèles en bois. Bientôt la soudure à l'arc s'est attaquée à la construction rivée. On a obtenu le pre-

mier succès dans les constructions navales, ensuite dans la charpente

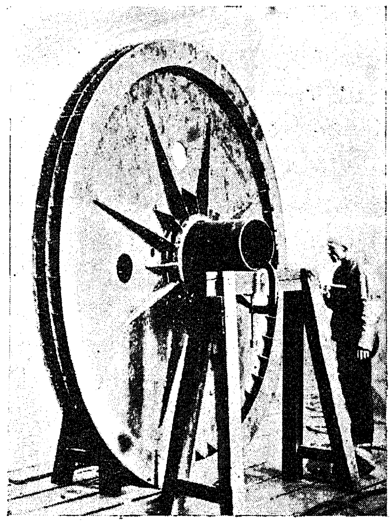


Fig. 10.

métallique, la construction du matériel de chemins de fer, de réservoirs, chaudières et conduits sous pression.

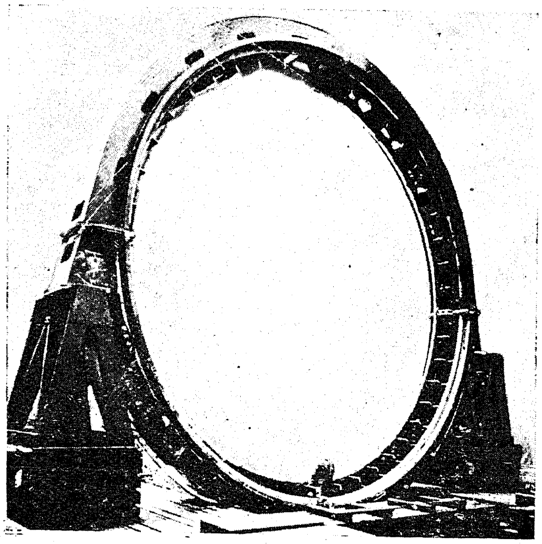


Fig. 11.

Voici le châssis (fig. 7) de la première locomotive électrique entièrement soudée.

Pour des bâtis de machines spéciales on emploie actuellement couramment des tôles soudées. La presse à papier de la fig. 8 a été allégée de cette façon, de la moitié de son poids, grâce à la soudure.

La soudure à l'arc est utilisée presque partout dans la construction électro mécanique. Voici (fig. 9) trois disjoncteurs dans l'huile de grande puissance entièrement soudés, destinés à un poste de transformation en plein air. La soudure a été exécutée à l'aide d'électrodes nues. Ces disjoncteurs sont prévus pour 200 000 V et 600 A.

La roue de ventilateur de la fig. 10, dont le diamètre est de 3m,50 était d'une soudure très délicate à cause de la déformation des tôles pendant la soudure.

La figure 11 représente la carcasse d'un alternateur triphasé, diamètre 10 m puissance 5 000 kVA, 2 100 V, vitesse 94 t/min. Combien cette pièce aurait coûté en acier coulé avec tous les frais de modèle et de l'usinage sur un tour géant !

Il ne suffit pas que les assemblages soudés soient d'un aspect irréprochable. Il faut s'assurer que la construction puisse supporter les plus gros efforts, même accidentels, dans la pratique.

(Film : Essais de choc d'une carcasse soudée d'un turbo alternateur.

Le film présente la carcasse normale d'un turbo-alternateur de 3 000 t/mn, qui, soulevée à une hauteur de 10 m, retombe sur un sol mou. Une seconde chute d'une hauteur de 9 m sur une dalle de béton d'une épaisseur de 7 cm démolit la dalle ; mais la pièce soudée n'a subi aucune déformation.)

LES SOURCES D'ALIMENTATION DE L'ARC POUR LA SOUDURE ÉLECTRIQUE AVEC BAGUETTE D'APPORT, ET PLUS PARTICULIÈREMENT, LES GÉNÉRATRICES DITES DE SOUDURE A COURANT CONTINU (1)

par M. J. Berger.

Ingénieur de la Société Alsthom.

Après avoir rappelé les caractéristiques principales des sources d'alimentation en courant de l'arc tel qu'il se présente dans ses applications à la soudure électrique avec baguette d'apport de métal, la présente communication étudie et compare plus particulièrement différents types de génératrices à courant continu établies spécialement dans ce but. Elle indique également certains dispositifs utilisés pour la soudure en courant alternatif.

I. — *Fonctionnement de l'arc en travail de soudure avec baguette d'apport.*

L'amorçage de l'arc est provoqué par la mise en contact momentané de la baguette avec la pièce à souder ; en écartant la baguette, l'arc jaillit, ionisant le milieu dans lequel il se produit et entraînant une certaine volatilisation du métal. Il se crée donc entre la baguette et la pièce à souder un chemin conducteur par lequel passe le courant, la chute de tension correspondante étant généralement admise égale à 25 V au maximum. La chaleur dégagée fait fondre le métal de l'électrode et celui de la pièce à souder dans la région immédiatement voisine de l'arc. Il se peut qu'il intervienne alors un transport continu de métal de la baguette à la pièce à souder ; cependant, il est certain qu'à des instants plus ou moins fréquents et entre lesquels s'écoulent des temps variant de quelques centièmes à un ou deux dixièmes de seconde, le transport s'effectue sous forme de gouttelettes de métal en fusion. La résistance équivalente de l'arc diminue alors considérablement ; la source d'alimentation est quasi mise en court-circuit et si elle était à tension constante, le courant prendrait une très grande valeur. En dehors du transport des goutte-

(1) Ce rapport sera présenté à la Séance de la 3e Section (du 20 octobre 1931) et à la semaine de discussions de novembre 1931 de la Société Française des Électriciens.

lettes, surtout dans le cas fréquent de soudure à la main, l'opérateur peut provoquer d'autres mises en court-circuit.

Quelle que soit la cause de ces court-circuits plus ou moins francs, il faut que l'intensité ne croisse pas alors exagérément ; sinon, il y a volatilisation accompagnée de projections de métal en fusion (crachements) et formation de cratères de métal brûlé, souvent occlus dans la soudure. On pourrait penser que l'idéal serait de pôsséder un moyen d'alimentation tel que, lors de ces variations très rapides de la résistance équivalente à celle de l'arc, le courant ne subisse aucune variation sensible Des expériences publiées récemment (1) et ayant pour but d'étudier surtout la pénétration de la soudure, font cependant ressortir que, lors d'essais effectués avec deux machines de caractéristiques par ailleurs identiques, mais avec courants de court-circuit différents, les meilleurs résultats ont été obtenus avec celle possédant le plus grand courant de court-circuit (37 pour cent de plus que l'autre environ). On peut admettre que de bonnes conditions de fonctionnement sont réalisées avec des courants de court-circuit atteignant 1,5 fois environ le courant de régime normal. Il faut donc obtenir un compromis, la surintensité devant être limitée et apparaître relativement lentement.

Par contre, lorsque le pseudo court-circuit a disparu, la tension doit réapparaître instantanément, avantageusement accompagnée d'une légère surtension de façon à assurer le maintien de l'arc.

C'est également un fait d'expérience que le meilleur travail est effectué avec un arc plus court, l'oxydation intervenant plus difficilement ; la source d'alimentation doit donc permettre le maintien d'un arc stable avec une tension aussi faible que possible (18 volts environ). Cette condition est d'ailleurs liée de près aux précédentes, en particulier au rétablissement rapide de la tension.

La présence d'une self-induction dans le circuit de l'arc de soudure a donc un effet avantageux en combattant les accroissements trop brusques du courant et en augmentant la tension à l'arc lors d'une diminution du courant ; de même, les meilleures sources d'alimentation sont celles qui possèdent des propriétés semblables soit par elles-mêmes, soit par adjonction d'un organe convenable, et nous nous proposons d'insister sur ce point en examinant les différents principes sur lesquels reposent les génératrices de soudure à courant continu.

---

(1) Voir *Zeitschrift des Vereines deutscher Ingénieure*, tome 74, 1930, page 1565. *Die Bedeutung der Einbrandtiefe beim Lichtbogenschweissen und die Mittel zu ihrer Verbesserung*, par M. Ernst SCHWARZ.

II. — *Caractéristiques et propriétés des sources d'alimentation de l'arc.*

Il résulte de ce qui précède que les sources d'alimentation de l'arc doivent :

1° Posséder une tension à vide suffisante pour l'allumage de l'arc et comprise suivant les cas entre 45 et 70 V, mais n'excédant pas sensiblement 80 V, sinon cette tension devient trop dangereuse à manier et amène le soudeur à s'isoler.

2° Avoir une caractéristique en charge telle qu'en régime établi, le courant de court-circuit ne dépasse pas exagérément le courant normal du régime de soudure envisagé.

3° Avoir une caractéristique dynamique telle que le courant de court-circuit instantané ne soit pas plus grand que le courant de court-circuit statique défini ci-dessus.

4° Répondre rapidement aux variations de régime, sans phénomènes transitoires.

5° Permettre plusieurs régimes de marche pour l'adaptation aux différentes conditions de fonctionnement qui peuvent se présenter, le ou les moyens de réglage étant de préférence à action continue.

6° Permettre le contrôle de l'habileté du soudeur.

7° Etre robustes, bien protégées, facilement transportables et d'un emploi simple.

III. — *Les sources d'alimentation à courant continu.*

L'alimentation de l'arc par du courant continu représente actuellement le mode le plus employé sur les deux continents ; la source utilisée peut être à tension constante mais, plus souvent, elle est constituée par une génératrice établie spécialement et c'est sur ce point que nous nous proposons de nous étendre plus particulièrement.

1° *Postes à tension constante.* — Dans ces postes, on dispose tout simplement une résistance, de préférence inductive, en série avec l'arc et on alimente l'ensemble sous tension constante. La tension d'allumage correspond évidemment à la tension U_0 de la source ; le courant de court-circuit permanent I_{cc} étant égal au quotient de cette tension U_0 par la résistance R. Pour une valeur quelconque du courant I pratiquement comprise entre O et I_{cc}, la tension U aux bornes de l'arc est donnée par la relation

$$U = U_0 - RI$$

à laquelle correspond, sur la figure 1, la droite joignant les points représentatifs des valeurs U_0 (pour $I = 0$ et I_{cc} (pour $U = 0$.) Pour faciliter l'interprétation de cette figure, on a figuré des échelles numériques pour lesquelles les valeurs normales de la tension U_a et du courant I_a à l'arc ont la valeur 100. La puissance utile dans l'arc

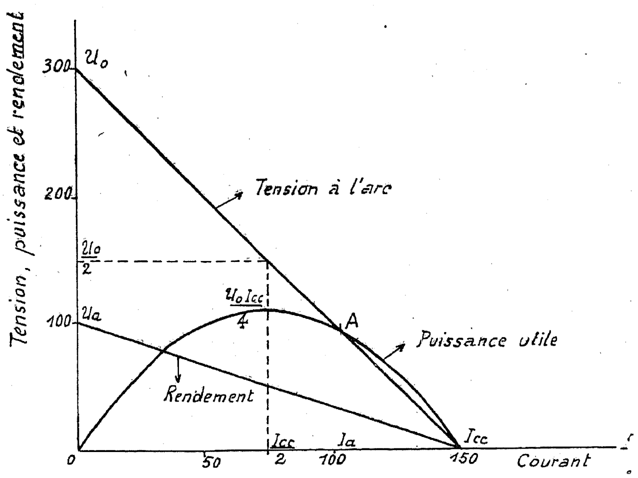


Fig. 1. — Caractéristiques de fonctionnement d'un poste à résistance.

$UI = U_0I - RI^2$, représentée en fonction de I, est une parabole coupant l'axe du courant aux points d'abscisses $I = 0$ et $I = I_{cc}$, et dont le maximum a pour valeur $\frac{U_0 I_{cc}}{4}$ et intervient pour le courant $\frac{I_{cc}}{2}$.

Le rendement, égal à $\frac{UI}{U_0 I} = \frac{U}{U_0} = 1 - \frac{RI}{U_0}$ est également une fonction linéaire de I; sur la figure 1, il est représenté par la droite joignant les points représentatifs des valeurs U_a (pour $I = 0$) et I_{cc} (pour $U = 0$) ; avec les valeurs admises, il n'est que de $\frac{1}{3}$ pour la charge normale.

Si on se place dans des conditions telles que la puissance utilisée dans l'arc corresponde au maximum, la tension du réseau est le double de la tension normale à l'arc, le courant de court-circuit est également double du courant normal de soudure et le rendement n'est encore que de 50 pour cent.

Ces postes sont donc caractérisés par un rendement faible ; pour favoriser celui-ci, il faut partir d'une tension U_0 aussi faible que pos-

sible, la résistance R étant alors telle que le courant de court circuit permanent atteint une valeur très élevée. On atténue cet inconvénient en mettant en série avec les résistances une bobine de self-induction ou mieux en disposant la résistance sous forme de solénoïde muni ou non d'un noyau magnétique, de préférence feuilleté. Dans ces conditions, l'expérience montre qu'on peut partir d'une tension constante de 40 V environ, l'effet de self faisant apparaître une tension totale de l'ordre de 60 V lors des réallumages.

Les distributions à 40 V n'existant pas, il faut, pour ces postes, envisager la transformation de la tension du secteur par un groupe convertisseur dont la génératrice donne une tension pratiquement constante et peut alimenter simultanément plusieurs postes de soudeurs; il s'ensuit naturellement que l'énergie empruntée au secteur est majorée des pertes dans le groupe convertisseur. En tenant compte, d'autre part, du facteur d'utilisation de ce dernier, on trouve que l'emploi des groupes convertisseurs individuels avec génératrice à caractéristiques favorables, est souvent plus économique malgré une dépense de premier établissement plus élevée ; ce dernier groupe étant seul à envisager si on n'installe qu'un seul poste.

2° *Postes à machines. Génératrices dites de soudure.* — Actuellement, la source d'alimentation des postes individuels est le plus fréquemment constituée par une génératrice spéciale à laquelle les constructeurs s'efforcent de donner des caractéristiques en charge se rapprochant d'ailleurs de celles du poste à résistances ; mais en régime variable, elles ont des propriétés particulières qui les rendent plus ou moins aptes à l'exécution de bonnes soudures.

Pour comparer ces machines, nous les classons comme suit :

a) Machines à excitation séparée, avec excitation série en opposition (anticompound) ;

b) Machines à excitations shunt et séparée additives, avec excitation série en opposition (anticompound) ;

c) Machines compound à grande réaction d'induit auto-excitatrices ;

d) Machines utilisant surtout la réaction d'induit.

a) *Machines à excitation séparée et anticompoundées.* — Pour limiter le courant de court-circuit de la génératrice, il vient naturellement à l'idée de faire agir sur son système inducteur un enroulement C (fig. 2) parcouru par le courant débité dans l'arc A et tendant à aimanter la

machine en sens inverse de l'enroulement d'excitation séparée S, comme l'indiquent les flèches. Le courant de court-circuit est alors sensiblement tel que les ampère-tours produits à ce régime par les

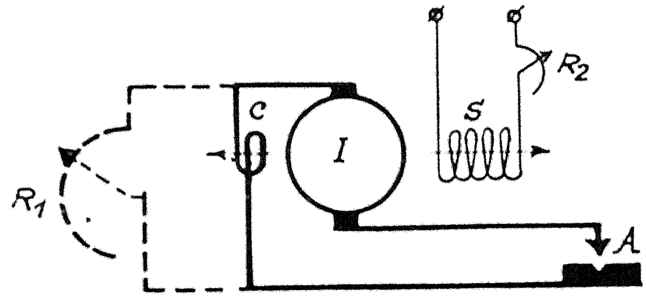


Fig. 2 — Génératrice anticompound à excitation séparée.

enroulements S et C sont égaux. Il est facile de se rendre compte qu'une telle machine, supposée non saturée, a des caractéristiques en charge linéaires, telles que celles représentées en trait plein sur la figure 3, en supposant négligeables les chutes de tension internes dues

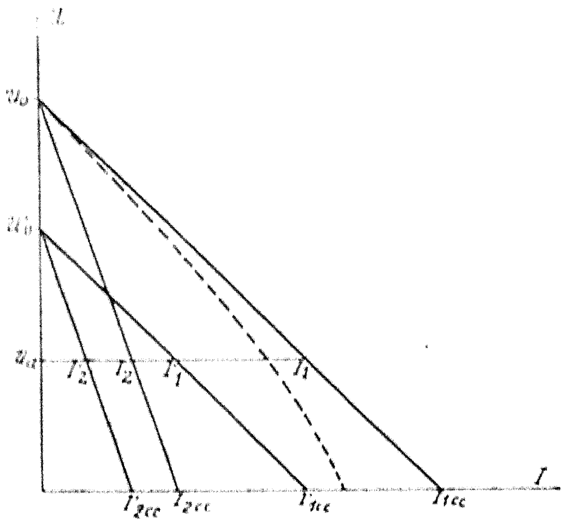


Fig. 3. — Caractéristiques en charge d'une génératrice de soudure anticompound à excitation séparée.

à la résistance ohmique ou à la distorsion (réaction d'induit). Si, partant d'un courant d'excitation dans S donnant une tension à vide U_o, on charge progressivement la machine en utilisant un certain nombre de spires C, la tension décroît proportionnellement au débit et devient nulle pour un débit I_{cc} correspondant à la relation d'ampère-tours

définie plus haut. En mettant, par exemple, trois fois plus de spires sur C, le courant de court-circuit est limité à une valeur

$$I_{2cc} = \frac{1}{3} I_{1cc}.$$

Souvent, on évite le réglage du nombre de spires de C en shuntant cet enroulement (ou une fraction comprenant par exemple, le ou les enroulements situés sur la moitié des pôles de la machine) par une résistance réglable R_1 représentée en pointillé sur la figure 2. Toutes choses égales d'ailleurs, si à l'aide d'un rhéostat R_2 on règle une excitation constante, correspondant à une tension à vide U'_0, les courants de court-circuit deviennent respectivement I_{2cc} et I'_{2cc}. Pour une tension à l'arc U_a, en combinant les réglages ci-dessus, on peut donc régler le courant à l'arc entre I_1 et I'_2 ; un rapport de 5 : 1 pour les valeurs de ces courants est très satisfaisant.

Pratiquement, en raison des chutes de tension et de la saturation, les caractéristiques ont l'allure de la courbe en pointillé de la figure 3.

La nécessité de loger, sur le système inducteur, les enroulements S et C ayant sensiblement la même importance, c'est-à-dire environ deux fois plus d'ampère-tours inducteurs que sur une machine normale, conduit à un dimensionnement plus grand et par suite à un poids de matières magnétiques et à une inertie magnétique plus élevés.

Les enroulements S et C sont rigidement accouplés magnétiquement et ne possèdent presque pas de fuites, l'un par rapport à l'autre ; si le courant augmente dans C, la diminution de flux (et par suite de tension aux bornes de l'induit I) qui devrait s'ensuivre est, en vertu de la loi de Lenz, combattue par une force électro-motrice induite dans S, tendant à augmenter le courant dans cet enroulement. Les relations entre tension et courant ne correspondent plus à celles de la figure 3 ; et la disparition rapide de la résistance équivalente à A est accompagnée d'une surintensité du courant dans l'arc, par rapport au courant de court-circuit en régime établi. De même, la diminution rapide du courant de court-circuit n'est suivie que d'un rétablissement lent de la tension ; les conditions de fonctionnement indiquées ci-dessus, étant encore accentuées par l'inertie magnétique de la machine.

Enfin, en cas de réglage à l'aide d'un rhéostat tel que R_1, lors des variations rapides du courant envisagées, ce courant se partage différemment entre C et R_1 suivant le taux de variation de ce courant ou suivant la valeur de R_1. L'enroulement C étant selfique, il se trouve

être le siège de variations moins rapides que celles du courant total et ce fait aggrave encore les effets de paresse indiqués précédemment en raison desquels le fonctionnement de l'arc ne bénéficie pas de tous les avantages devant résulter de la présence de l'enroulement C sur la machine.

Ces inconvénients ont fait abandonner ce genre de machines par un grand nombre de constructeurs ; certains le construisent encore cependant, l'effet d'anticompoundage étant parfois obtenu en partie sur la machine principale et en partie sur l'excitatrice alimentant l'enroulement S. Quelle que soit la disposition adoptée, on ne peut être sûr d'obtenir un travail convenable d'un ouvrier moyen, qu'en introduisant une self induction élevée dans le circuit de l'arc.

b) *Machines à excitation shunt et séparée additives et anticompoundées.* — Le système inducteur porte trois enroulements, un enroulement d'excitation séparée, un enroulement d'excitation shunt agissant dans le même sens que le précédent et un enroulement parcouru par le courant dans l'arc, agissant en opposition avec les deux premiers.

Les caractéristiques en charge ont une allure encore plus tombante que celle figurée en pointillé sur la figure 3, le courant de court-circuit étant à peine supérieur au courant de régime (machines à courant constant). Malgré cela, les inconvénients signalés précédemment subsistent ; la très grande complication du système inducteur aidant, les constructeurs ne semblent pas avoir retenu ce genre de machines.

c) *Machines compound à grande réaction d'induit auto excitatrices.* — Ayant reconnu l'influence très défavorable de l'induction mutuelle des enroulements inducteurs de la machine anticompound et du dimensionnement magnétique qui en résulte, on a réalisé une machine compound dont la figure 4 donne une représentation schématique sous une forme différente de celle adoptée pour la figure 3. La machine comporte un enroulement d'excitation shunt S et un enroulement d'excitation série C agissant dans le même sens, de sorte que, en passant du fonctionnement à vide au fonctionnement en court-circuit, il y a, en quelque sorte, substitution de l'excitation série à l'excitation shunt, ce changement étant alors aidé par l'induction mutuelle des deux enroulements S et C.

Pour limiter le courant de court-circuit, on utilise l'action de la réaction d'induit qui, dans une machine normale, provoque avec la charge le phénomène connu sous le nom de distorsion du flux et se

traduit déjà par une chute de tension. Dans le cas particulier, la réaction d'induit est accentuée par le choix d'un nombre relativement grand de conducteurs sur l'induit et ses conséquences sont rendues plus sensibles par l'adoption d'un entrefer relativement faible. Ces moyens n'étant pas encore suffisants, les pièces polaires principales sont dissymétriquement échancrées comme le représente la figure 4, de façon à créer des chemins de réluctances inégales et correspondant aux sections figurées en D et H. A vide, l'induction peut être sensiblement

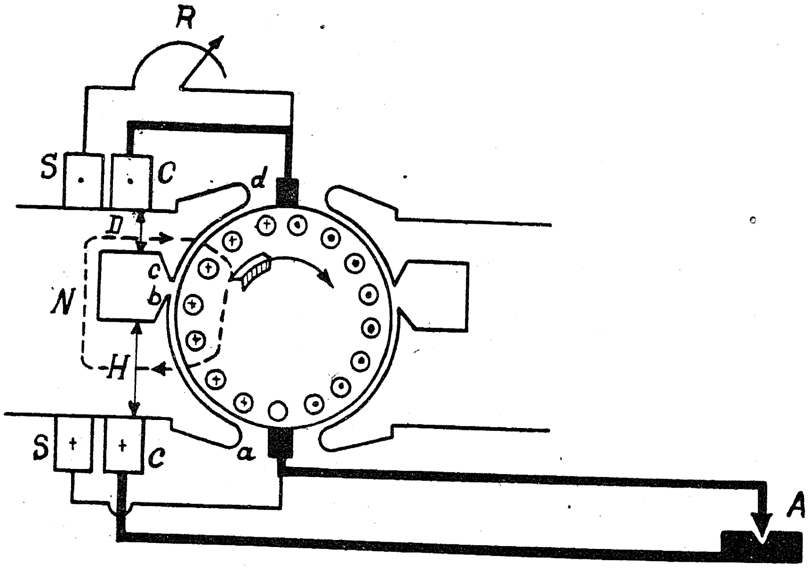


Fig. 4. — Génératrice compound à grande réaction d'induit.

la même sous les fractions *ab* et *cd* de l'épanouissement polaire total, car la saturation n'est pas atteinte en D, mais en charge et surtout en court-circuit, il en est tout autrement, l'induction sous la fraction *ab* changeant même de sens. La figure 4 indique, pour le sens de rotation correspondant à la flèche, le sens des courants parcourant les conducteurs de l'induit en charge et le parcours d'une des lignes de force dues à la réaction d'induit.

Le réglage du courant de soudure s'obtient très simplement à l'aide d'un rhéostat R, et par conséquent, en partant de tensions à vide différentes ; quelle que soit la position de R, l'enroulement shunt correspondant n'ayant plus aucune action en court-circuit, le courant de court-circuit est donc le même pour tous les réglages.

Les caractéristiques en charge d'une telle machine sont représen-

tées sur la figure 5, en partant des tensions limites à vide de 42 et 83 V ; le rapport des courants de soudure extrêmes $\frac{I_1}{I_2}$ n'est que $\frac{3}{1}$ environ, valeur pratiquement faible pour une bonne utilisation de la machine.

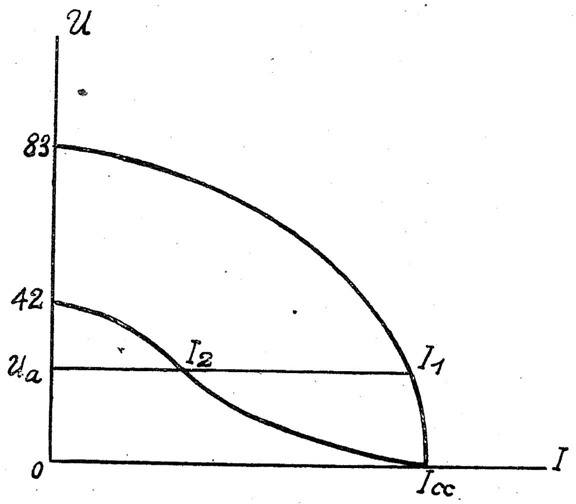


Fig. 5. — Caractéristiques en charge d'une génératrice de soudure compound, à grande réaction d'induit.

Pour les faibles intensités, le courant de court-circuit est beaucoup trop grand d'une part ; la tension à vide étant faible d'autre part, l'amorçage et l'entretien de l'arc sont pénibles.

Malgré les propriétés avantageuses de la machine, le courant de court-circuit *instantané* est très élevé ; bien que ceci ne corresponde qu'à une pointe assez courte, son influence sur la soudure d'une part et sur la commutation et par suite sur la bonne conservation de la machine d'autre part est très néfaste. L'emploi de pôles de commutation n'est d'ailleurs pas susceptible de changer ces conclusions.

d) *Machines utilisant surtout la réaction d'induit.* — Les machines que nous envisageons ici doivent surtout leurs caractéristiques à des utilisations plus ou moins différentes des ampères-tours de l'induit en charge pour limiter le courant de court-circuit ; leur système inducteur ne comporte en principe qu'un seul enroulement d'excitation.

Une première disposition est représentée par la figure 6 et s'apparente par certains points à la machine décrite au paragraphe (c). Pour un induit bipolaire dont les balais principaux sont figurés en B_1 et B_2, le système inducteur comprend quatre pôles dont deux pôles nord

désignés par N_1 et N_2, et deux pôles sud désignés par S_1 et S_2. Les pôles N_2 et S_2 les plus en avant par rapport au sens de rotation possèdent un étranglement D (figuré à la base du pôle) destiné à saturer le chemin des lignes de force traversant ces pôles. Le pôle N_2 par exemple, étant à peu près saturé lors de la marche à vide, le flux qui le traverse n'augmente pas sensiblement avec la charge et la tension qui appa-

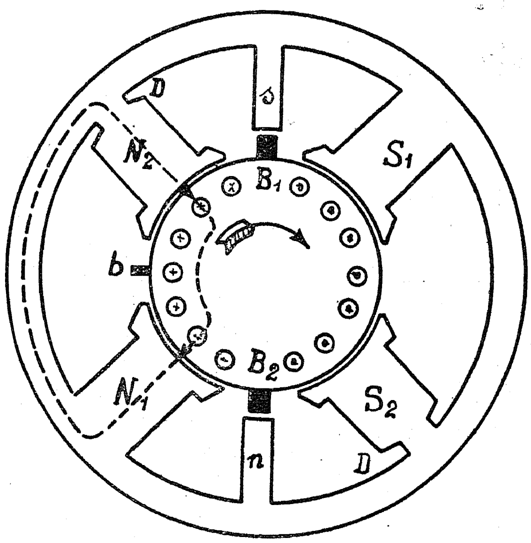


Fig. 6. — Machine à pôles divisés, utilisant la réaction d'induit et excitée sur troisième balai.

raît entre le balai B_1 et un balai *b* est sensiblement constante et peut servir pour l'alimentation de l'enroulement inducteur ; la machine est auto-excitatrice.

La machine est munie de pôles de commutation représentés sur la figure 6 et dont les lettres *n* et *s* figurent également les polarités. On comprend facilement que, pour un calage des balais plus en avant dans le sens de la rotation par rapport à la position figurée, la caractéristique en charge présentera une chute plus rapide, car le léger affaiblissement de la réaction d'induit est plus que compensé par la réduction de la tension induite entre les balais B_1 et B_2 ; on produit, en réalité, une action semblable à celle d'une excitation anticompound sans l'inconvénient signalé aux paragraphes (a) et (b) car les enroulements des pôles principaux et des pôles de commutation n'ont théoriquement pas d'induction mutuelle. Au point de vue du fonctionnement, le décalage des balais dans le sens indiqué reste conciliable avec de bonnes

conditions de commutation, les conducteurs des spires en commutation se trouvant toujours dans des régions où le champ est favorable.

Pratiquement, le réglage du courant de soudure s'obtient par décalage des balais et par réglage de l'excitation. Ce genre de machine est encore actuellement construit par une grande société américaine ; une bobine de self-induction assez forte est montée en série dans le circuit de l'arc.

Une autre disposition, adoptée surtout par les constructeurs allemands, est représentée sur la figure 7 ; elle dérive de la génératrice à

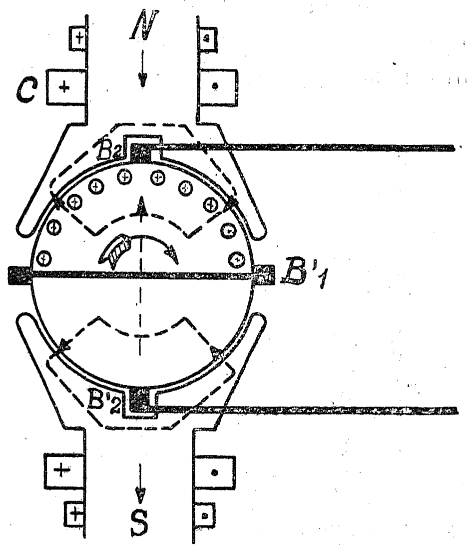


Fig. 7. — Machine à excitation interne par balais court-circuités.

excitation interne par balais court-circuités qui, sous le nom de dynamo Rosenberg, est employée pour l'éclairage des trains par génératrices individuelles entraînées par un essieu du wagon, et fonctionnant en parallèle avec une batterie d'accumulateurs. A vide, sous l'influence du rémanent éventuellement renforcé par une légère excitation indépendante, les conducteurs situés entre les balais B_1 et B'_1 court-circuités sont le siège d'un courant induit qui, la forme très enveloppante des pièces polaires aidant, produit un champ en quadrature avec l'axe des pièces polaires et induit une tension apparaissant maximum entre les balais B_2 et B'_2. Ces balais, situés sous l'axe des pièces polaires principales, sont utilisés pour l'alimentation de l'arc ; pour faciliter la commutation sous ces balais, il est indiqué de ménager des échancrures telles que celles figurées dans les pièces polaires. Si on

fait débiter du courant aux balais $B_2B'_2$, le champ de réaction d'induit correspondant à ce courant est en opposition avec le champ initial des pièces polaires principales. Le courant débité par une telle machine est donc limité à une valeur telle que le champ de réaction correspondant devienne sensiblement égal au champ principal. Ce débit serait très faible si la valeur du champ initial à vide restait constante ; pour l'augmenter avec la charge, on augmente la valeur du champ inducteur en disposant, sur les pôles, des spires C parcourues par le courant des balais $B_2B'_2$. Pour obtenir des caractéristiques en charge différentes on peut, soit régler le nombre des spires inductrices utilisées, soit opérer par shuntage de tout ou partie des spires existantes. Les caractéristiques en charge obtenues ont l'allure représentée en figure 8 ; le courant de court-circuit est très limité. Quant à la tension

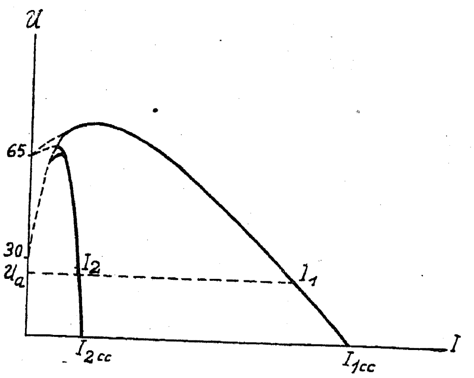


Fig. 8. — Caractéristiques en charge d'une génératrice de soudure à excitation interne.

à vide, sans excitation indépendante, elle est d'environ 30 V, l'excitation indépendante permet d'atteindre une valeur plus convenable (65 V par exemple).

Pour mieux faire comprendre ce qui se passe dans cette machine, nous avons reproduit la machine supposée développée linéairement sur la figure 9 (*a*). L'aimantation initiale correspondant aux polarités nord N et sud S, les conducteurs de l'induit, perpendiculaires au plan de la feuille et situés entre les balais court-circuités $B_1B'_1$, sont parcourus par des courants figurés par des + s'ils s'éloignent du lecteur et par des . s'ils s'en rapprochent, pour le sens de rotation correspondant à la flèche F. Il résulte de la superposition des lignes de force dues au champ produit par le courant circulant entre les balais $B_1B'_1$ et des lignes de force issues des pôles N et S, un renforcement de l'in-

duction sous les fractions *cd* et *c'd'* des épanouissements polaires, tandis que, en raison de la faible valeur du champ initial, l'induction sous la partie telle que *a'b'* s'inverse et devient de même sens que sous la partie *cd*. Si on porte, comme l'indique la figure 9 (*b*), des ordonnées proportionnelles aux tensions produites dans les conducteurs de l'induit, on obtient une courbe représentative de ces tensions à vide telle

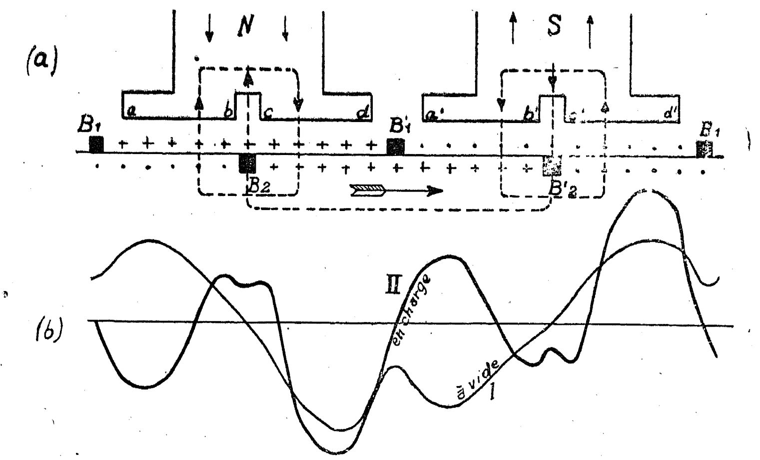


Fig. 9. — Répartition des ampère-tours et des inductions dans une machine à excitation interne à vide et en charge.

que la courbe I. La tension qui apparaît entre les balais B_2 et B'_2 est évidemment proportionnelle à la surface comprise entre la courbe I et l'axe des abscisses pour les points d'abscisses correspondant à la position des balais B_2 et B'_2. L'induction dans les dents de l'induit subit donc, à vide, des oscillations de fréquence triple de la fréquence fondamentale, auxquelles doivent correspondre des pertes à vide sensibles.

En charge, sous l'action de la réaction d'induit et de l'enroulement C, comme nous l'avons déjà expliqué, la courbe représentative des tensions induites est la courbe II. Cette courbe coupe plusieurs fois l'axe des abscisses et la surface donnant la tension entre les balais B_2 et B'_2 diminue jusqu'à devenir sensiblement nulle pour le fonctionnement en court-circuit. Pour les très faibles débits, comme l'indique l'allure des courbes de la figure 8, la surface considérée commence à croître par rapport à sa valeur à vide jusqu'à ce que la saturation se fasse sentir sur le trajet des lignes de force issues des fractions *cd*, *c'd'*, la tension aux bornes passe ensuite par un maximum et décroît rapidement pour des débits plus élevés.

Au point de vue du fonctionnement en régime de débit rapidement

variable, les variations de flux ne sont pas gênées par des influences d'induction mutuelle ; seule, l'inertie magnétique intervient.

Nous ferons une remarque relative à la production du champ en quadrature par le courant des balais court-circuités. Pour produire un champ donné, la disposition des conducteurs répartis dans les encoches de l'induit n'est pas aussi favorable que si tous ces conducteurs étaient concentrés (comme lorsqu'ils sont disposés sur un pôle), et d'autre part, la longueur moyenne d'une spire inductrice est beaucoup plus grande dans le premier cas que dans le second ; ces deux raisons contribuent à réduire la valeur du rendement en charge.

Il ne nous paraît pas superflu d'ajouter quelques mots sur la commutation, en faisant tout d'abord remarquer que celle-ci entraîne les mêmes variations relatives de courant dans les spires passant sous les balais B'_1 et B'_2 par exemple. Comme dans une machine normale, le balai B'_1, dans les conditions où sont tracées les figures 8 et 9, devrait se trouver sous l'influence d'un pôle sud ; or, à vide, il se trouve dans un champ résultant correspondant à un pôle nord comme on le voit d'ailleurs bien sur la courbe I de la figure 9 (*b*) ; ces conditions s'atténuent avec la charge et le balai se trouve alors dans un champ total résultant de valeur sensiblement nulle. Quant au balai B'_2, il semble que, se trouvant sous un pôle sud, les conditions sont favorables. En réalité, à vide, le champ résultant est à peu près nul dans l'axe des pôles, comme il ressort de la courbe I de la figure 9 (*b*) ; en charge, dans la même région, ce sont les ampère-tours dus à la charge et à tous les conducteurs situés entre les balais B_2 et B'_2 qui prédominent, tandis que dans les régions voisines de part et d'autre des balais B_2 et B'_2, c'est le champ dû à l'enroulement C qui prévaut ; ce fait est également mis en évidence par la courbe II de la figure 9 (*b*). Les moins bonnes conditions de commutation se présentent donc à vide pour les balais B_1 et B'_1 et en charge pour les balais B_2 et B'_2.

La génératrice de soudure « Alsthom ». — Après différentes tentatives, la Société Alsacienne à Belfort a reconnu dès 1925 l'avantage des machines utilisant surtout la réaction d'induit et la Société Alsthom continue à construire des machines établies comme celle que nous allons décrire, après les avoir sérieusement comparées avec les machines à pôles subdivisés décrites au début de ce paragraphe et conduisant déjà à des résultats très favorables. La figure 10 (*a*) représente la disposition sous la même forme que la figure 9 ; par rapport à la disposition normale, la machine est caractérisée par un développement plus grand

des pôles de commutation, d'où s'ensuit une légère réduction du développement des pôles principaux. Les épanouissements polaires sont excentrés par rapport à l'induit comme il est figuré, de sorte qu'à vide, le chemin des tubes de force vers la corne polaire principale d est déjà très voisin de la saturation. Les inducteurs principaux portent un seul enroulement d'excitation séparée. Le réglage total du courant de sou-

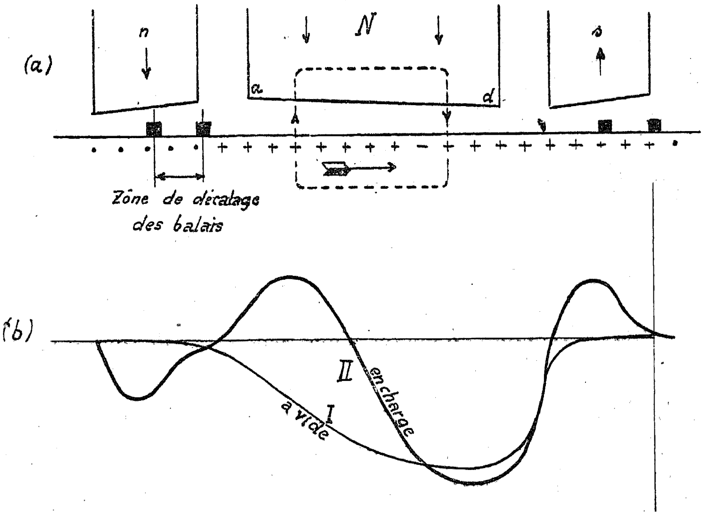


Fig. 10. — Répartition des ampères-tours et des inductions dans une génératrice de soudure Alsthom à vide et en charge pour la position des balais correspondant au courant de soudure minimum.

dure dans un rapport de 1 à 5 s'opère d'une façon continue par décalage des balais; pour le courant maximum, les balais se trouvent au voisinage de l'axe des pôles auxiliaires n et s, et on utilise presque uniquement le phénomène de la réaction d'induit pour limiter le courant de court-circuit. Pour réduire le courant, on décale les balais dans le sens de la rotation, ce qui ajoute, à la réaction d'induit, l'action d'anticompoundage des pôles auxiliaires. On a figuré en 10 *(a)* la zone dans laquelle s'opère pratiquement le décalage.

La figure 10 (*b*) a été tracée dans les mêmes conditions que la figure 9 (*b*) pour le calage correspondant au courant minimum. A vide, la courbe I a une forme beaucoup moins contrariée que celle de la figure 9 (*b*) d'où résultent des pertes plus faibles ; en charge, la courbe II a assez bien la même allure que la courbe II de la figure 9 (*b*).

On se rend facilement compte que les balais se trouvent toujours dans une zone de champ favorable à la commutation. L'utilisation

des matières actives de la machine n'obligeant à accentuer le dimensionnement d'aucune partie, l'inertie magnétique est minimum et aucun phénomène d'induction mutuelle n'altère le fonctionnement en régime rapidement variable. Les caractéristiques en charge ont une allure sensiblement linéaire comme le représente la figure 11 ; la tension à

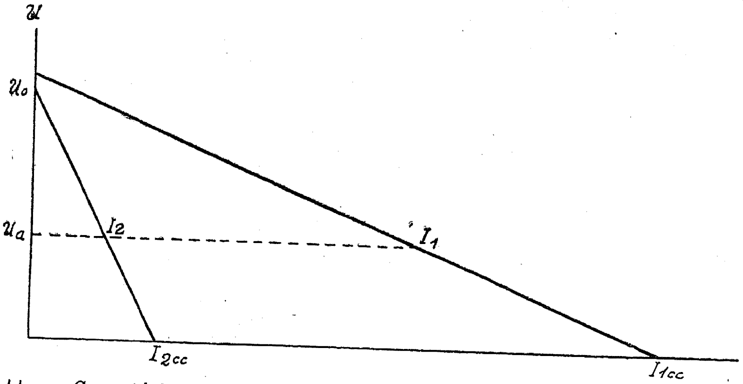


Fig. 11. — Caractéristiques en charge d'une génératrice de soudure Alsthom.

vide U_0 est très sensiblement la même pour tous les réglages et égale à 65 V environ, le rapport des courants de soudure extrêmes réalisables sur une même machine atteint sensiblement 1 à 5.

La machine nécessite une excitatrice; celle-ci, largement prévue, permet de disposer, sous environ 30 V constants, de la puissance nécessaire à l'alimentation d'une tête de soudure automatique ou à l'alimentation de lampes.

En dehors des groupes constitués par la génératrice accouplée au moteur d'entraînement par manchon semi-élastique et montés sur un socle commun, la Société Alsthom construit aussi ces groupes sous la forme mono-bloc, le moteur et la génératrice étant enfermés dans la même carcasse et montés sur le même arbre ; l'ensemble, appareillage compris, est placé sur un chariot à faible largeur de voie et forme un tout compact et bien protégé contre les chocs et les intempéries comme le montre la figure 12. La génératrice de ce groupe est susceptible de débiter, sous 25 V, un courant de 240 A en marche continue et de 300 A en marche unihoraire dans les conditions d'échauffement prescrites par les règlements français; la consommation à vide (génératrice excitée) est d'environ 1 500 W et le rendement global (toutes pertes du moteur et de la génératrice comprises) atteint 51 pour cent pour le débit de 240 A sous 25 V. Le poids total de ce groupe (chariot compris) est de 1 150 kg.

La Société Alsthom construit également, sous la forme monobloc un groupe extra-léger dont la génératrice fournit, sous 25 V, un courant de 140 A en marche continue ou de 180 A en marche unihoraire et dont le poids total est de 500 kg.

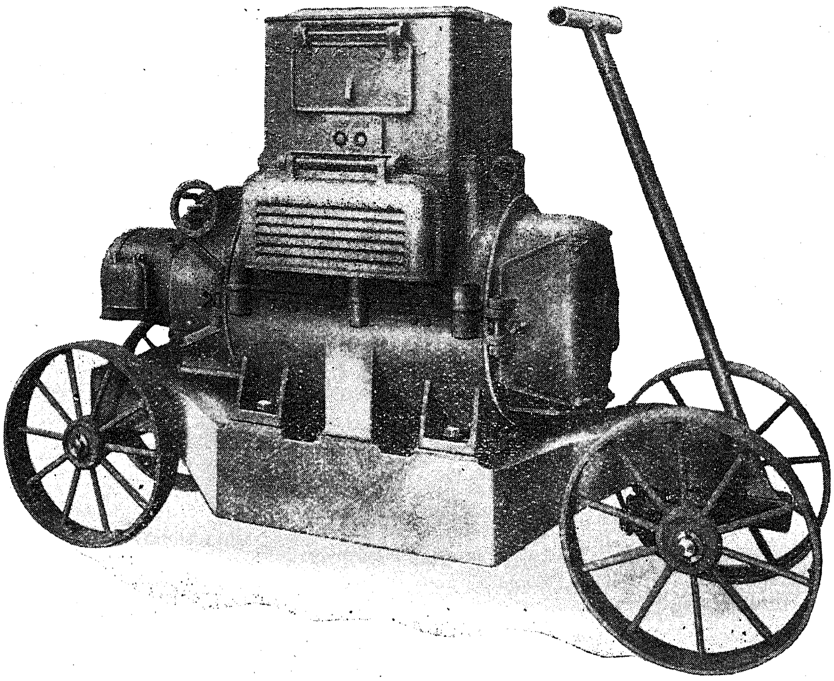


Fig. 12. - Groupe de soudure monobloc Alsthom.

IV. — *Utilité d'une bobine de self-induction dans le circuit de l'arc.*

Nous avons déjà dit tous les avantages qu'introduit la présence d'une self-induction dans le circuit de l'arc et qui consistent surtout dans la limitation du courant de court-circuit et le rétablissement rapide de l'arc après un court-circuit ; en un mot, une telle bobine facilite l'entretien de l'arc.

La Société Alsthom utilise, pour cette bobine, une disposition particulière, proposée par M. Bethenod et brevetée dans les différents pays. La figure 13 reproduit la disposition schématique de la génératrice de soudure G supposée à excitation indépendante, alimentée par une excitatrice E. L'introduction d'une bobine de self-induction dans l'arc consisterait à faire passer le courant de l'arc dans un enroulement P bobiné sur un noyau magnétique N. L'artifice consiste à utiliser en quelque sorte l'enroulement P comme primaire d'un transformateur,

et à disposer sur le noyau N un second enroulement S placé sur le circuit d'excitation de la génératrice. Les enroulements P et S ne doivent pas avoir de fuites relatives ; cette disposition revient donc à créer une induction mutuelle entre les circuits parcourus par le courant principal et par le courant d'excitation. Pour le cas des génératrices anticompoundées des paragraphes (a) et (b), la bobine d'induction mutuelle pourrait être dimensionnée et branchée de façon à compenser l'influence très gênante de l'induction mutuelle des excitations

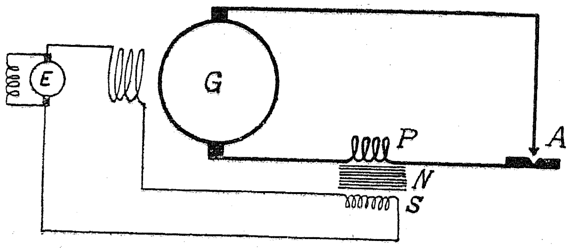


Fig. 13. – Schéma de montage de la bobine d'induction mutuelle Alsthom sur une génératrice de soudure.

shunt ou séparée et série et même avantageusement de façon à la surcompenser légèrement. Nous avons dit que dans le cas des génératrices à grande réaction d'induit décrites au paragraphe (*d*), il n'existait pas théoriquement d'induction mutuelle entre les enroulements inducteurs et induit ; ceci n'est pas rigoureux par suite de l'influence de la saturation, le flux principal ayant tendance à baisser avec la charge comme dans une machine anticompound. Avec ces machines, la bobine d'induction mutuelle extérieure sert d'une part à équilibrer l'effet d'induction mutuelle intérieure et, d'autre part, à provoquer dans le circuit d'excitation, en cas de variations rapides du courant dans l'arc, un léger coup de fouet propre à corriger l'effet de ces variations.

L'avantage de la bobine d'induction mutuelle sur la simple bobine de self-induction est très sensible ; c'est ainsi que le type de machine à pôles subdivisés décrit en premier lieu au paragraphe (d) et utilisé depuis de nombreuses années aux Etats-Unis avec une simple inductance en série avec l'arc, vient d'être muni, par la maison qui la construit, d'une inductance mutuelle à la suite d'un voyage d'études fait en France par les ingénieurs spécialisés dans cette construction.

Avec le genre de génératrice construit par l'Alsthom et décrit à la fin du paragraphe (d), l'emploi de l'inductance mutuelle n'est pas

impératif et on peut s'en dispenser pour des installations destinées à des travaux simples. Mais on peut affirmer qu'en réduisant les pertes de temps et la consommation en électrodes (diminution des projections de métal), elle procure des avantages qui amortissent rapidement la dépense supplémentaire qu'elle occasionne, surtout dans l'emploi de la soudure automatique.

V. — *Relevés oscillographiques.*

Pour illustrer ce que nous avons dit précédemment, nous reproduisons trois oscillogrammes faisant ressortir le fonctionnement des machines à la mise en court-circuit et à l'ouverture du court-circuit.

L'oscillogramme de la figure 14 est particulièrement caractéristique;

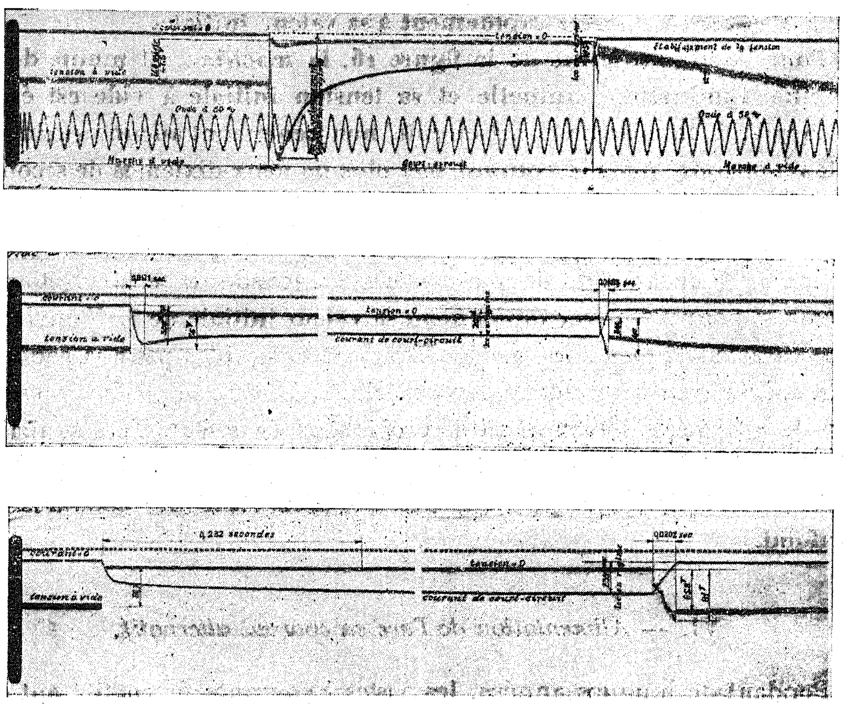


Fig. 14-15-16. — Relevés oscillographiques de mise en court-circuit et d'ouverture.

il a été relevé sur une machine compound telle que celle décrite au paragraphe c. La tension à vide étant égale à 47,5 V, en court-circuitant la machine, le courant atteint en $\frac{1}{50}$ seconde environ, la valeur très exagérée de 940 A, soit 4,85 fois la valeur du courant de court-cir-

cuit en régime, égale à 195 A, valeur qui n'est pratiquement atteinte qu'au bout de deux cinquièmes de seconde environ. A la rupture du court-circuit, la tension ne réapparaît que lentement; elle met pratiquement deux cinquièmes de seconde pour retrouver sa valeur initiale de 47,5 V.

Les oscillogrammes des figures 15 et 16 ont été relevés dans les mêmes conditions sur une génératrice Alsthom avec et sans bobine d'induction mutuelle. L'oscillogramme de la figure 15 est relevé sans bobine d'induction; la tension à vide étant de 56 V, à la mise en court-circuit, le courant accuse une légère surintensité égale à 300 A après un peu plus d'un centième de seconde et baisse assez rapidement à sa valeur de régime de 202 A. A la rupture du court-circuit, il y a une pointe de tension égale à 56,5 V, atteinte moins d'un centième de seconde après la coupure; la tension ne retombe ensuite qu'à 30,4 V et retrouve assez rapidement à sa valeur initiale.

Pour l'oscillogramme de la figure 16, la machine est munie de sa bobine d'induction mutuelle et sa tension initiale à vide est égale à 60,7 V. A la mise en court-circuit, non seulement aucune surintensité n'apparaît, mais le courant met plus de deux dixièmes de seconde pour atteindre pratiquement sa valeur de régime égale à 235 A. A la rupture du court-circuit, il y a pointe sensible de surtension atteignant 81 V au bout de deux centièmes de seconde; la tension retombe à 65,8 V pour retrouver rapidement sa valeur initiale de 60 V environ. Ces caractéristiques sont particulièrement favorables pour la soudure car, même avec un soudeur peu expérimenté, il ne se produit presque pas de collages d'électrode ni de projections de métal. L'arc se maintient stable très facilement, et ce n'est qu'avec une machine ayant de telles caractéristiques qu'il est possible d'effectuer des soudures au plafond.

VI. — *Alimentation de l'arc en courant alternatif.*

Pendant de longues années, les postes à courants alternatifs ont été très peu employés; il faut en trouver la raison dans le fait que cette forme de courant se prêtait moins bien que le courant continu à l'alimentation d'un arc. Ce n'est que grâce aux travaux de quelques savants, en particulier de M. Bethenod, et à la mise au point des baguettes enrobées que ce matériel a pu se généraliser. La caractéristique tension-courant à obtenir est évidemment la même que dans le cas d'un poste à courant continu, mais pour l'obtenir, il suffit d'inter-

caler en série avec l'arc une réactance, au lieu d'une résistance dans le cas du courant continu, pour obtenir un débit limité.

On évite ainsi la consommation d'énergie réelle dans la résistance, mais elle est compensée par une consommation d'énergie réactive. M. Bethenod a montré, d'une manière très simple que, dans ce cas, le rapport de la tension aux bornes de l'arc à la tension à circuit ouvert est égal au produit du rendement par le facteur de puissance. Ce produit est pratiquement de l'ordre de 0,4. Sous la forme simple d'une réactance en série avec l'arc, le poste de soudure à courant alternatif absorbe une puissance purement monophasée. Dans le cas de l'alimentation simultanée de plusieurs postes de soudure, on utilise de préférence un transformateur triphasé-diphasé du type Scott ou Leblanc, alimentant deux réseaux de soudure à 60 ou 70 V sur lesquels on répartit le plus également possible les différents postes, composés dans ce cas d'une simple réactance ; le réglage de l'intensité de soudure s'effectue à l'aide de prises sur la bobine.

Dans le cas d'un poste unique, on combine avantageusement le transformateur monophasé abaisseur avec la réactance (transformateurs à fuites). En disposant d'une façon particulière les enroulements primaire et secondaire, on peut régler le courant de soudure à l'aide d'une simple barrette de prise de courant, sans affecter le rapport de transformation du transformateur abaisseur et par suite sans changement de la tension secondaire à vide. On obtient ainsi un matériel robuste, simple et compact et à faible consommation d'énergie ; il présente toutefois, par rapport au poste à groupes convertisseurs à courant continu, deux inconvénients qui méritent d'être signalés.

L'arc alternatif étant moins stable que l'arc en courant continu, on ne peut guère employer que des baguettes spécialement enrobées alors qu'un bon poste à courant continu peut se prêter aussi bien à la marche avec baguettes nues qu'avec baguettes enrobées.

En outre, les secteurs de distribution s'accommodent généralement mal du déséquilibre produit par la charge monophasée très réactive de ces postes. Le déséquilibre dans les tensions de distribution qui peut en résulter, a pour effet de provoquer des déséquilibres plus importants dans le courant absorbé par les moteurs d'induction installés sur les mêmes feeders de distribution que le poste de soudure monophasé. Pour éviter cet inconvénient, on peut par un dispositif à contacteurs, provoquer la fermeture, au moment où l'arc s'établit, d'un circuit auxiliaire de déphasage convenable, dont la consommation

vient équilibrer celle de l'arc en provoquant, bien entendu, une augmentation de la consommation d'énergie.

Une solution récente qui a reçu quelques applications importantes, est due à M. Bethenod, elle consiste à alimenter en courants diphasés une baguette double formée de deux fils du métal d'apport convenablement isolés l'un de l'autre. L'alimentation se fait à l'aide d'un transformateur triphasé-diphasé du type Leblanc dans le primaire duquel est intercalé une inductance variable d'une façon continue par réglage de l'entrefer. L'arc obtenu est bien stable et correspond à l'absorption de courants parfaitement équilibrés sur les trois phases du réseau d'alimentation.

POSTES DE COMPTAGE POUR INSTALLATIONS TRIPHASÉES A NEUTRE ACCESSIBLE (1)

par M. G. Maillat,

Ingénieur à l'Union d'Electricité.

Les compteurs haute tension, qui sont universellement adoptés aujourd'hui pour l'intégration des énergies triphasées, sont tous conçus pour l'application de la méthode dite des 2 wattmètres (2 W).

Nous nous sommes demandés pourquoi cette méthode dont la parfaite compréhension échappe souvent au personnel chargé de l'entretien des compteurs, avait toujours eu la préférence sur la méthode plus rationnelle et si simple des 3 wattmètres (3 W).

Nous pensons que l'origine de ce véritable engouement doit remonter à une époque assez lointaine, où les transformateurs des petits réseaux de distribution haute tension étaient généralement du type triangle-triangle, 110 V.

Cette méthode était alors la seule appliquée en haute et basse tension, lorsque plus tard il fallut étendre le rayon d'action des postes de transformation, l'on fut conduit pour augmenter les voltages secondaires, à adopter le système triangle étoile 110-190 V, la méthode des 3 wattmètres devint applicable tout au moins aux comptages « basse tension ».

Des raisons économiques étouffèrent l'essort qu'elle aurait dû prendre. Le coût des appareils de comptage représentait alors une fraction assez importante du prix de revient total des installations, et l'économie faite en appliquant la méthode 2 W n'était pas négligeable, elle représentait environ le tiers du prix de revient d'un système 3 W.

Devant l'importance toujours croissante des installations, ces considérations économiques perdaient progressivement leur valeur au point de ne plus en avoir aujourd'hui, mais la méthode des 2 W n'en a pas moins conservé toute la faveur qu'elle avait acquise à ses débuts.

Cependant, toutes les fois que le neutre d'un système triphasé est accessible, les avantages que l'on peut retirer de l'application de la

(1) Ce rapport sera présenté à la Semaine de Discussions de novembre 1931.

méthode 3 W, à l'aide de trois compteurs monophasés, sont tels qu'il ne devrait pas y avoir d'hésitation entre les deux procédés de mesure.

Ces avantages sont d'ordres multiples, nous allons les énumérer tout en comparant entre elles les deux méthodes que nous désignerons dans la suite par les signes 2 W et 3 W.

Dans le cours de cet exposé, nous supposerons que le neutre du système triphasé est accessible, dans le cas où il ne l'est pas, la méthode 3 W reste applicable par l'emploi d'un neutre fictif, mais elle perd alors beaucoup de son intérêt pratique et nous n'en conseillerons pas l'emploi.

Nous n'envisageons également que le cas des comptages haute tension, laissant au lecteur le soin d'adapter les raisonnements aux cas d'ailleurs plus simples des comptages basse tension.

Les installations actuelles comportent généralement deux transformateurs de potentiel établis pour la tension composée et deux réducteurs d'intensité isolé pour cette même tension.

Avec la méthode des 3 W trois réducteurs de chaque type sont nécessaires, l'inconvénient qui paraît en résulter n'est qu'apparent. Voici pourquoi :

1° les transformateurs de potentiel n'ont plus à supporter que la tension simple ;

2° les réducteurs d'intensité peuvent être placés au voisinage du point neutre.

Lorsque celui-ci est à la terre, et ce cas particulier est maintenant de plus en plus fréquent, leur isolement peut être considérablement réduit.

Pour les très hautes tensions, l'ensemble de ces dispositions a pour résultat une économie notable sur l'encombrement et les frais d'installation des postes de comptage.

Quand on désire être assuré du bon fonctionnement d'un poste de comptage 2 W sans être conduit à des vérifications trop fréquentes, il est prudent de le doubler, mais cela est toujours coûteux.

Pour les très hautes tensions, les dépenses à engager sont telles qu'on y renonce bien souvent ; avec la méthode des 3 W, nous estimons que cette précaution n'est plus nécessaire.

En effet, dans les installations importantes, les charges se répartissent généralement très bien entre les trois circuits du système triphasé. D'ailleurs, on a intérêt à faire le nécessaire pour qu'il en soit ainsi, l'on dispose alors de trois comptages indépendants les uns des autres qui

enregistrent chacun le tiers de l'énergie, ce qui équivaut presque à un triple comptage et donne, en tous cas, une sécurité suffisante.

Ainsi lorsqu'un défaut se manifeste dans l'un quelconque des organes composant le comptage, l'attention est de suite attirée par la différence des indications des compteurs.

Si, à l'origine, le défaut se produit sur un seul des compteurs, les indications des deux autres peuvent encore permettre une approximation suffisante de l'énergie consommée.

La recherche du défaut peut se faire facilement et sans appareils de contrôle, surtout si l'on dispose d'un 4e compteur de référence. Il peut encore être décelé par simple permutation de deux compteurs, le troisième servant alors pour la détermination de l'énergie.

L'installation d'un poste de comptage établi sur le principe des 2 wattmètres n'offre aucune difficulté, le schéma en est très simple. Cependant les mauvais montages sont des plus fréquents.

A ce sujet, M. Toupet, de l'Association alsacienne des Propriétaires d'appareils à vapeur signale dans l'industrie électrique du 10 février 1930, le cas d'un mauvais montage qui persistait depuis 14 années dans une usine consommant plusieurs millions de kWh par an.

Nous pourrions, de notre côté, donner de nombreux exemples de mauvais montages qui, heureusement, n'ont pas persisté aussi longtemps.

Combien d'électriciens, peu dignes de ce nom, il est vrai, se déclarent satisfaits lorsqu'après avoir branché leur filerie au petit bonheur, ils arrivent à voir le compteur tourner dans le bon sens ! mais hélas, cela n'est pas la preuve que l'enregistrement soit exact.

L'agent de contrôle, qui se trouve en présence de pareils montages, est souvent embarrassé et perd son temps en conjectures. En effet, dans les postes d'interconnexions des réseaux, par exemple, il ne lui est pas toujours possible d'avoir des renseignements précis sur le sens d'écoulement de l'énergie, sur la nature des récepteurs et souvent il lui faut travailler sans pouvoir faire couper le courant.

Dans le cas particulier où le déphasage est voisin de 0,5, il lui sera impossible d'acquérir la certitude d'avoir convenablement rectifié le montage.

Enfin, il ne faut pas oublier qu'un comptage de ce type, dont les connexions sont défectueuses est toujours exact pour un cosinus déterminé et que, dans ce cas, une comparaison effectuée même en haute tension à l'aide d'appareils étalons ne révèlera rien d'anormal.

Ajoutons que dans le cas des 2 W le fonctionnement d'un fusible de

transformateur de potentiel rend difficile la détermination des énergies consommées.

Il n'en est plus de même avec la méthode des 3 W ; les trois compteurs sont indépendants les uns des autres et l'énergie enregistrée dans ce cas est très sensiblement les 2/3 de celle indiquée aux deux compteurs restants.

Les compteurs à deux éléments wattmétriques sont moins faciles à régler que les compteurs monophasés, cela est dû en partie à l'action réciproque des éléments les uns sur les autres. De plus, l'ordre de branchement des phases n'est jamais indifférent.

L'élément qui enregistre $EI \cos (\varphi + 30°)$ fonctionne à un cos φ toujours très bas (0,866 pour une marche en phase de l'ensemble 0,27 pour un cosinus du réseau de 0,7). Les compteurs et les wattmètres qui servent à les régler n'ont plus à ces régimes qu'une précision illusoire. Il en est de même des transformateurs d'intensité.

Le réglage des compteurs monophasés d'un système 3 W, fonctionnant au cos φ du réseau, s'en trouve facilité et la mesure gagne en précision.

La vérification d'un poste de comptage 2 W, nécessite trois opérateurs et 2 wattmètres, alors qu'il est possible deux opérateurs de vérifier un à un les compteurs d'un système 3 W avec un seul appareil.

Lorsque la recherche d'une meilleure utilisation du matériel et des lignes des réseaux eut conduit à la tarification des unités réactives, le compteur à deux éléments wattmétriques fut d'un grand recours pour les exploitants. Ceux-ci l'utilisèrent, sans aucune modification apparente, pour la détermination de 2UI sinus φ, cette méthode était peu précise.

Plus tard, les constructeurs d'appareils à la recherche d'un meilleur dispositif donnant directement $\sqrt{3}EI$ sinus φ, s'efforcèrent de construire des compteurs dont le branchement ne différait pas de celui des compteurs d'énergie.

Ceci n'a pu être obtenu, dans certains appareils, qu'en s'accrifiant l'exactitude, aussi, les pouvoirs publics n'ont-ils pas cru devoir les approuver.

Ainsi, lorsqu'on envisage la tarification des unités réactives, est-il nécessaire de déterminer l'appareil dont on fera usage, car deux compteurs, de fabrication différente, donnent généralement des résultats différents.

Ces inconvénients n'existent plus lorsque l'on effectue la mesure sur chacun des trois circuits d'un système triphasé, on peut alors faire

usage de compteurs monophasés du même modèle que ceux servant à la mesure de l'énergie, la mesure reste exacte quel que soit le modèle du compteur adopté.

Ajoutons que le réglage sur place du système de comptage des unités réactives en sera de beaucoup facilité.

Actuellement, la vérification des compteurs à deux éléments wattmétriques est plus longue et exige plus d'appareillage de contrôle que celle des compteurs d'énergie ce qui est paradoxal, ces derniers étant de beaucoup les plus importants. Toutefois, pour faire usage des mêmes compteurs monophasés 110 V dans les deux genres de mesures, énergie et unités réactives, il est nécessaire d'employer trois transformateurs réducteurs de $\frac{110}{\sqrt{3}}$. Ceci ne semble pas être un inconvénient bien grave, car dans beaucoup d'installations, les appareils de mesure autres que les compteurs nécessitent également la présence de cette même tension.

En dehors de tous les avantages que nous avons énumérés au sujet de la précision et de la facilité de réglage de compteurs monophasés, il en existe d'autres qui, pour être d'un ordre différent, n'en sont pas moins importants.

Nous pensons que les services s'occupant d'exploitation de réseaux trouveraient un grand intérêt à l'application de la méthode des 3 wattmètres. L'observation des écarts journaliers entre compteurs actifs et réactifs surtout, peut renseigner dans une certaine mesure sur l'état du matériel de distribution, machines et câbles. Nous avons pu observer. à ce sujet, quelques cas dans lequel le mauvais état de ce matériel aurait été immédiatement signalé par des écarts entre compteurs monophasés; voici deux exemples typiques :

a) dans un poste de distribution dont l'alimentation se faisait par deux centrales mises en parallèle par les barres même du poste, nous avions constaté un important déséquilibre des courants fournis par les deux centrales. Des mesures effectuées par la méthode des 3 wattmètres nous ont permis de déceler le mauvais fonctionnement d'un transformateur de puissance de l'une des centrales,

b) dans ce cas, deux câbles alimentant en parallèle un poste de distribution ne se répartissaient pas également les énergies à véhiculer.

La méthode 3 W nous a permis de trouver que l'une des boites de connexion de l'un des câbles était défectueuse.

Conclusions. — L'application aux postes de comptage à neutre acces-

sible de la méthode des 3 wattmètres, à l'aide de trois compteurs monophasés, permet d'acquérir une précision de mesure plus grande, tout en économisant le temps nécessaire aux vérifications, le personnel, le matériel de contrôle.

Quand il s'agit de très hautes tensions, elle permet l'exécution de montages simples et économiques. Elle est susceptible de donner aux services d'exploitation des réseaux, des renseignements précieux sur l'état des machines et des câbles.

BAR-LE-DUC. — IMP. COMTE-JACQUET *Le gérant :* Alfred MAGNIER.

5e série, tome I, n° 9. Septembre 1931

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS

SOMMAIRE

COMMUNICATIONS TECHNIQUES ET DISCUSSIONS (1) :

Courants de court-circuits dans les canalisations en câbles armés (M. V. GENKIN), p. 886. — Accidents de l'électricité (M. le Professeur ZIMMERN), p. 898. — L'arc électrique et son application à la soudure (M. C. LÉONARD), p. 938. — La protection sélective des réseaux contre les courts-circuits au moyen de courants à haute fréquence (M. G. FALLOU), p. 956. — Sur l'échauffement des appareils électriques et sa mesure rapide (M. P. BUNET), p. 971. — Phasemètre à fer tournant pour circuits triphasés non équilibrés, échelle 360° (M. A. ILIOVICI), p. 978.

INFORMATIONS DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ELECTRICIENS :

a) Elévations dans l'ordre de la Légion d'honneur, p. 996.
b) 25e Réunion annuelle de l'Illuminating Engineering Society, p. 996.

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

COURANTS DE COURT-CIRCUIT DANS LES CANALISATIONS EN CABLE ARMÉ [1]

par M. V. Genkin.

Dans un réseau souterrain dont le point neutre est relié en permanence au sol et comportant des câbles armés, le courant de court-circuit à la terre emprunte au retour la chemise de plomb du câble et le sol. L'importance relative des courants dans ces deux circuits dépend non seulement de la conductibilité du sol mais aussi de l'inductance mutuelle favorisée par la présence d'un feuillard en acier et existant entre les conducteurs du câble et l'enveloppe.

L'étude qui suit a pour objet la recherche de l'impédance apparente intervenant en ce cas particulier dans le calcul des courants de court-circuit. Elle est complétée par les résultats d'essais effectués au Laboratoire des « Câbles de Lyon » de la Compagnie générale d'Electricité.

Impédances symétriques.

Nous aurons en vue un réseau à tension moyenne suffisamment basse pour qu'on soit en droit de négliger l'effet de capacité dans le calcul des courants de court-circuit.

Dans ce cas tout système triphasé symétrique est complètement défini par trois impédances apparentes Z_d, Z_i et Z_0 correspondant aux trois régimes possibles d'équilibre.

L'impédance directe Z_d se manifeste en charge triphasée équilibrée, la succession des phases étant directe par définition.

L'impédance inverse Z_i se rapporte également à une charge triphasée équilibrée avec une séquence de phases inverse à la précédente.

Enfin l'impédance Z_0 d'ordre zéro est celle qui correspond au régime de trois courants égaux en grandeur et *en direction* dans les trois phases.

Les trois impédances symétriques Z_d, Z_i et Z_0 sont des impédances apparentes tenant compte de l'induction mutuelle entre les conducteurs des différentes phases. La connaissance de ces grandeurs rend facilement accessible au calcul tout régime équilibré ou non, pouvant avoir lieu dans le réseau et en particulier facilite l'étude des courants de court-circuit quelle que soit la nature du défaut.

(1) Ce rapport sera discuté à la Semaine de Discussions de novembre 1931.

Sans entrer dans les détails de calcul, nous croyons utile de rappeler brièvement le principe de la méthode des coordonnées symétriques, particulièrement bien adaptée à l'analyse des régimes troublés.

Supposons que, sous l'influence d'un court-circuit, les tensions deviennent déséquilibrées à l'endroit du défaut et désignons par U'_d, U'_i, U'_0, leur trois composantes symétriques.

En dehors de la région troublée, il doit exister dans le réseau un point plus ou moins éloigné du défaut où les tensions restent équilibrées. En ce point on aura : $U_d = U$, $U_i = 0$, $U_0 = 0$. Si la répercussion du défaut est générale, ce point se trouvera dans l'alternateur lui-même et on considérera comme système équilibré les trois forces électromotrices, induites dans les enroulements de la machine.

En vertu de l'indépendance réciproque des composantes symétriques, on pourra alors appliquer la loi de KIRCHOFF généralisée à chacune d'elles et établir ainsi trois relations entre U_d et U'_d, U_i et U'_i, et U_0 et U'_0.

En tenant compte des conditions imposées aux courants et aux tensions par la nature particulière du défaut, on disposera de tous les éléments nécessaires à la résolution du problème.

Le résultat du calcul fournira tout d'abord les composantes symétriques I_d, I_i et I_0 des courants cherchés. On déterminera ensuite à l'aide des formules classiques reproduites plus bas les courants réels circulant dans les trois phases.

Posons $j = \sqrt{-1}$ et désignons par α un opérateur rotationnel de la forme

$$\alpha = \cos\frac{2\pi}{3} + j\sin\frac{2\pi}{3}. \tag{1}$$

A l'aide de l'opérateur α les courants dans les trois phases s'expriment comme suit en fonction de leurs composantes symétriques.

$$\begin{aligned} I_1 &= I_d + I_i + I_0 \\ I_2 &= \alpha I_d + \alpha^2 I_i + I_0 \\ I_3 &= \alpha^2 I_d + \alpha I_i + I_0. \end{aligned} \tag{2}$$

A titre d'exemple, considérons les trois cas suivants représentés par les fig. 1, 2 et 3.

Le premier se rapporte à une mise à la terre accidentelle d'un conducteur, dans le deuxième le court circuit intéresse deux phases et reste isolé du sol et dans le troisième le défaut affecte les trois phases à la fois.

Le point A est l'endroit du réseau où les tensions restent équilibrées

malgré la présence du défaut en D. Le courant du défaut s'écoule de A vers D et rencontre sur son chemin les impédances Z_d, Z_i et Z_0 comprenant celles du réseau et de tous les organes de génération ou de transformation interposés sur son passage.

Dans les trois cas particuliers, les résultats de calcul sont les suivants (1) :

1° Court-circuit entre une phase et le sol (fig. 1).

En désignant par U la tension agissant du point A dans la phase 1

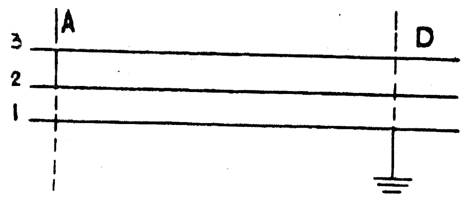


Fig. 1.

affectée par le défaut, les composantes symétriques du courant de défaut sont :

$$I_0 = I_d = I_i = \frac{U}{Z_0 + Z_d + Z_i}. \qquad (3)$$

Des relations (2) on tire la valeur des courants réels dans les trois phases.

$$I_1 = \frac{3U}{Z_0 + Z_d + Z_i}, \qquad I_2 = 0, \qquad I_3 = 0. \qquad (4)$$

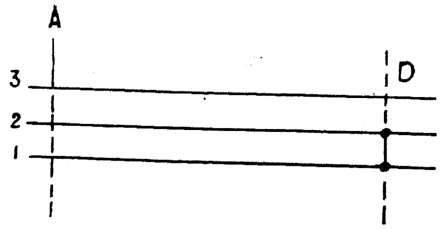


Fig. 2.

2° Court-circuit entre deux phases (fig. 2).

En faisant usage des mêmes notations on trouve :

$$I_d = \frac{U}{Z_d + Z_i}, \qquad I_i = -\frac{\alpha U}{Z_d + Z_i}, \qquad I_0 = 0. \qquad (5)$$

(1) M. Fallou. Calcul des courants de court-circuit, S. F. E. Semaine de discussions d'octobre 1926.

(2) M. Mackerras, Circulation of single phase short circuits, *G. E. R*, 1926, p. 218, 468.

Les courants de défaut dans les trois phases sont donc :

$$I_1 = -I_2 = (1 - \alpha)\frac{U}{Z_d + Z_i}, \qquad I_3 = 0 \tag{6}$$

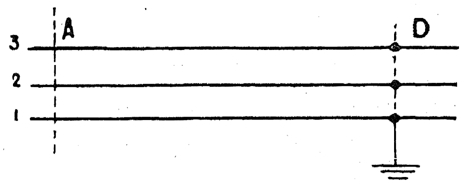


Fig. 3.

3° Court-circuit triphasé (fig. 3).

Dans ce cas on a évidemment :

$$I_d = \frac{U}{Z_d}, \qquad I_i = 0, \qquad I_0 = 0 \tag{7}$$

$$I_1 = I_d, \qquad I_2 = \alpha I_d, \qquad I_3 = \alpha^2 I_d. \tag{8}$$

Impédances en court-circuit d'un câble triphasé

Les impédances symétriques Z_0, Z_d et Z_i figurant dans les expressions des courants de court-circuit se rapportent à une portion du réseau composée d'éléments très différents. Celles qui nous intéressent tout spécialement sont relatives au câble lui-même.

En absence de toute dyssymétrie rotationnelle dans un câble comportant trois torons symétriques, on doit avoir $Z_d = Z_i$.

Cette constante est déterminée par un essai en court-circuit triphasé équilibré.

Quant à la deuxième impédance caractéristique Z_0, sa valeur est variable suivant le chemin choisi par le courant de retour lors d'un défaut au sol. En admettant que le courant revienne uniquement par l'enveloppe de plomb, l'impédance Z_0 serait déterminée par un essai direct qui consisterait à faire circuler un certain courant dans le câble en prenant comme conducteur aller les trois cordes réunies en parallèle et comme retour la chemise de plomb.

Bien que les trois constantes Z_d, Z_i et Z_0 se rapportent à un seul des trois conducteurs, elles tiennent compte par définition de l'induction mutuelle entre phases. Dans les essais destinés à les déterminer, il est donc nécessaire de faire circuler les courants convenables dans les trois conducteurs du câble.

Cependant, en admettant que la loi de superposition des flux soit

valable, on peut substituer aux essais en régime équilibré, deux essais équivalents en monophasé.

Si on applique (fig. 2) la tension entre les conducteurs 1 et 2 réunis en court-circuit et si on mesure l'impédance Z_{12} d'un tel circuit monophasé, on trouve de la relation (6)

$$Z_d + Z_i = Z_{12}.$$

D'autre part, si la tension d'essai est appliquée en A entre une corde et la chemise de plomb réunies en court-circuit (fig. 1) en D, on tire de la formule (4) une autre relation entre l'impédance Z_{10} ainsi mesurée et les constantes symétriques.

$$Z_0 + Z_d + Z_i = 3Z_{10}.$$

De ces deux équations on tire les valeurs des impédances symétriques Z_d et Z_0.

$$Z_d = Z_i = \frac{1}{2} Z_{12}, \qquad (9)$$

$$Z_0 = 3Z_{10} - Z_{12}. \qquad (10)$$

L'essai a démontré que les réactances calculées des mesures en monophasé sont de 13 à 17 pour 100 inférieures à leurs valeurs en régime équilibré.

Ce résultat doit être sans doute attribué à une variation de la perméabilité magnétique du feuillard en acier.

Impédance caractéristique Z_0.

Il a été déjà observé que dans un réseau dont le point neutre est relié au sol, le courant de défaut revient en partie par le plomb du câble et en partie par la terre.

Dans ces conditions, l'impédance Z_0 ayant des valeurs différentes suivant la conductibilité du sol, ne saurait être déterminée, du moins en principe, par un essai direct sur un échantillon de câble.

Il est cependant possible, moyennant quelques hypothèses et connaissant les constantes du câble, de prédéterminer par un calcul les limites de variation de l'impédance Z_0.

Il semble permis d'admettre que vis-à-vis de la composante résiduelle (I_0) des courants, le câble armé d'un feuillard en matière magnétique se comporte comme un transformateur à trois enroulements.

Le circuit primaire d'un tel transformateur serait constitué par les trois conducteurs en cuivre, le secondaire par l'enveloppe de plomb en parallèle avec le sol et le tertiaire par un circuit fictif fermé sur lui-

même et remplaçant par son action l'effet des courants induits dans le plomb.

En désignant par U_1 et U_2 les tensions primaire et secondaire et par I_1 et I_2 les courants correspondants, les équations de fonctionnement d'un transformateur sont :

$$U_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2, \quad U_2 = Z_{22}I_2 + Z_{12}I_1. \tag{11}$$

S'il existe un troisième circuit fermé sur lui-même, les impédances propres Z_{11}, Z_{22} et l'impédance mutuelle Z_{12} englobant son action

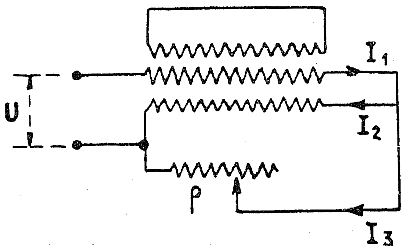


Fig. 4.

contiendront de ce fait, toutes trois, un terme réel à côté du terme imaginaire.

En admettant qu'un câble soumis à l'action de la composante résiduelle des courants soit assimilable à un transformateur, on aboutit au schéma équivalent de la figure 4.

Le circuit primaire est en contact avec le circuit secondaire à l'endroit du défaut. Chaque corde du câble étant parcourue par un courant I_1, le courant total $3I_1$ se dirige vers le défaut et revient à la source d'énergie par deux chemins différents, l'enveloppe du câble laissant passer un courant I_2 et le sol un courant I_3.

En nous basant sur le schéma équivalent de la figure 4, nous nous proposons d'étudier le fonctionnement du câble pour toute valeur de la résistance du sol ρ comprise entre 0 et ∞.

Si on désigne par U la tension agissant à l'origine du câble entre l'ensemble des conducteurs et le plomb, le schéma de la figure 4 permet d'écrire les trois relations suivantes :

$$\begin{aligned} U &= Z_{11}3I_1 - Z_{12}I_2 + Z_{22}I_2 - Z_{12}3I_1, \\ \rho I_3 &= Z_{22}I_2 - Z_{12}3I_1 \\ 3I_1 &= I_2 + I_3. \end{aligned} \tag{12}$$

Des deux dernières on tire le rapport des courants I_2 et I_1

$$\frac{I_2}{3I_1} = \frac{Z_{12} + \rho}{Z_{22} + \rho}. \tag{13}$$

On remarque que si l'impédance mutuelle Z_{12} entre les cordes et l'enveloppe n'est pas nulle, le courant I_2 dans le plomb ne disparaît pas, même dans le cas où le sol serait parfaitement conducteur ($\rho = 0$).

L'expression de l'impédance apparente totale variable avec la résistance ρ s'obtient en éliminant les courants I_2 et I_3 des équations (12). Sa valeur rapportée à *un seul* des trois courants I_1 est :

$$Z_0 = \frac{U}{I_1} = Z_{11} - Z_{12} + (Z_{22} - Z_{12})\frac{Z_{12} + \rho}{Z_{22} + \rho}. \qquad (14)$$

Dans cette expression, les impédances Z et la résistance ρ ont des valeurs triples par comparaison aux précédentes. Pour ne pas surcharger l'écriture, nous laisserons les mêmes notations et nous poserons pour abréger :

$$A = \frac{Z_{12} + \rho}{Z_{22} + \rho}. \qquad (15)$$

Le nombre complexe A, d'ailleurs égal au rapport des courants $\frac{I_2}{3I_1}$, est le seul terme variable dans l'expression (14).

Pour aller plus loin, explicitons les constantes généralisées du transformateur en posant :

$$\begin{aligned} Z_{11} &= R_{11} + j\omega L_{11}, \\ Z_{22} &= R_{22} + j\omega L_{22}, \\ Z_{12} &= R_{12} + j\omega L_{12}. \end{aligned} \qquad (16)$$

Revenons à l'expression (15) et introduisons une nouvelle variable r

$$r = R_{22} + \rho. \qquad (17)$$

Il vient :

$$A = \frac{r + R_{12} - R_{22} + j\omega L_{12}}{r + j\omega L_{22}}. \qquad (18)$$

Pour simplifier l'étude, nous représenterons le nombre complexe A par un diagramme vectoriel et nous choisirons comme variable indépendante un angle θ défini comme suit :

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{r}{\omega L_{22}} = \frac{R_{22} + \rho}{\omega L_{22}}. \qquad (19)$$

Exprimons la grandeur A en fonction de la variable indépendante

$$A = I + \frac{R_{12} - R_{22}}{\omega L_{22}} \sin\theta\cos\theta + \frac{\omega(L_{12} - L_{22})}{\omega L_{22}}\cos^2\theta + j\left[\frac{\omega(L_{12} - L_{22})}{\omega L_{22}}\sin\theta\cos\theta - \frac{R_{12} - R_{22}}{\omega L_{22}}\cos^2\theta\right]. \qquad (20)$$

Pour abréger nous poserons :

$$D = \frac{\sqrt{(R_{22} - R_{12})^2 + \omega^2 (L_{22} - L_{12})^2}}{\omega L_{22}},$$

$$\sin \psi = \frac{R_{22} - R_{12}}{\sqrt{(R_{22} - R_{12})^2 + \omega^2 (L_{22} - L_{12})^2}},$$

$$\cos \psi = \frac{\omega (L_{22} - L_{12})}{\sqrt{(R_{22} - R_{12})^2 + \omega^2 (L_{22} - L_{12})^2}}.$$

L'expression (20) prend la forme :

$$A = I - D \sin \theta \cos \theta \sin \psi - D \cos^2 \theta \cos \psi$$
$$- j[D \sin \theta \cos \theta \cos \psi - D \cos^2 \theta \sin \psi]. \qquad (20\ bis)$$

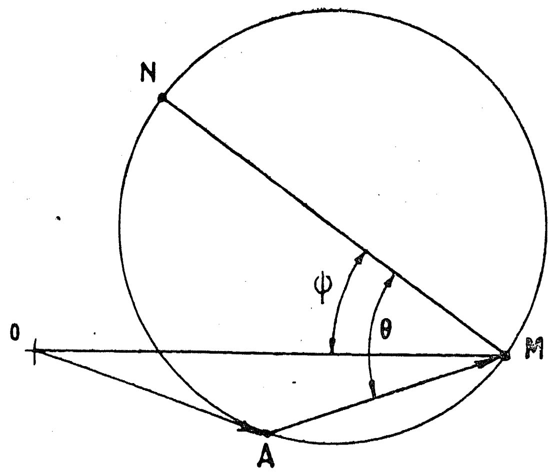


Fig. 5.

On voit facilement que dans un plan complexe du vecteur A décrit une circonférence de diamètre D.

Ce diagramme circulaire est représenté sur la figure 5. On pose

$$OM = I,$$

la circonférence passe par le point M et son centre C est situé sur une droite MN faisant un angle ψ avec OM. Pour tout angle $\theta = NMA$ pris comme variable, le nombre A est représenté par un vecteur tel que OA.

Les trois courants I_1, I_2, I_3 sont lus sur la même épure.

En effet, si à une certaine échelle, OM représente I_1, on aura à la même échelle $OA = I_2$ $AM = I_3$.

On vérifie que le courant I_2 dans l'enveloppe de plomb diminue en même temps que la résistance du sol ρ mais n' ne s'annule pour aucune valeur de ρ.

Le diagramme circulaire de la figure 5 se laisse facilement transformer en celui de l'impédance apparente totale Z_0.

L'expression de Z_0 en notation symbolique est :

$$Z_0 = Z_{11} - Z_{12} + (Z_{22} - Z_{12})A \qquad (14\ bis)$$

Tous les termes de cette expression sauf A étant des constantes, la construction de l'épure vectorielle de l'impédance Z_0 est immédiate.

Par rapport aux axes OX, OM, on porte le vecteur

$$00' = Z_{11} - Z_{12} \quad \text{et} \quad O'M = Z_{22} - Z_{12}.$$

Le centre de la circonférence sera situé sur une droite MN faisant un angle ψ avec 0^1M et son diamètre aura pour valeur,

$$MN = \frac{(R_{22} - R_{12})^2 + \omega^2(L_{22} - L_{12})^2}{\omega L_{22}}. \qquad (21)$$

L'impédance apparente totale correspondant à une valeur particulière de la variable est figurée sur l'épure par le vecteur OA.

Les limites de variation de l'impédance Z_0 correspondent à $\rho = \infty$ et $\rho = 0$. Elles sont :

$$(Z_0)_\infty = Z_{11} + Z_{22} - 2Z_{12}, \qquad (24)$$

$$(Z_0)_0 = Z_{11} - \frac{Z_{12}^2}{Z_{22}}. \qquad (23)$$

Trace de l'épure circulaire d'après les résultats d'essai.

Le diagramme circulaire de la figure 6 est défini par deux essais en court-circuit.

En appliquant une tension d'essai U entre les trois cordes du câble réunies en parallèle et raccordées au plomb à l'extrémité opposée, on mesure directement

$$00' = Z_{11} - Z_{12} \quad \text{et} \quad 0^1M = Z_{22} - Z_{12}$$

Si le courant circulant dans chaque corde est I et les tensions mesurées entre le point commun D (fig. 7) et la source sont U^1 et U^{11} on a :

$$Z_{11} - Z_{12} = \frac{U'}{I}, \qquad Z_{22} - Z_{12} = \frac{U''}{I}. \qquad (24)$$

En remarquant que l'angle ψ est *l'angle complémentaire* de l'argument de l'impédance $Z_{22} - Z_{12}$, on conclut qu'un essai en court-circuit suivant le schéma de la figure 7 détermine les points 0' et M de l'épure ainsi que l'orientation de la droite MN contenant le centre de la circonférence.

Le deuxième essai en court-circuit est représenté schématiquement sur la figure 8. La tension d'essai U est appliquée aux extrémités des

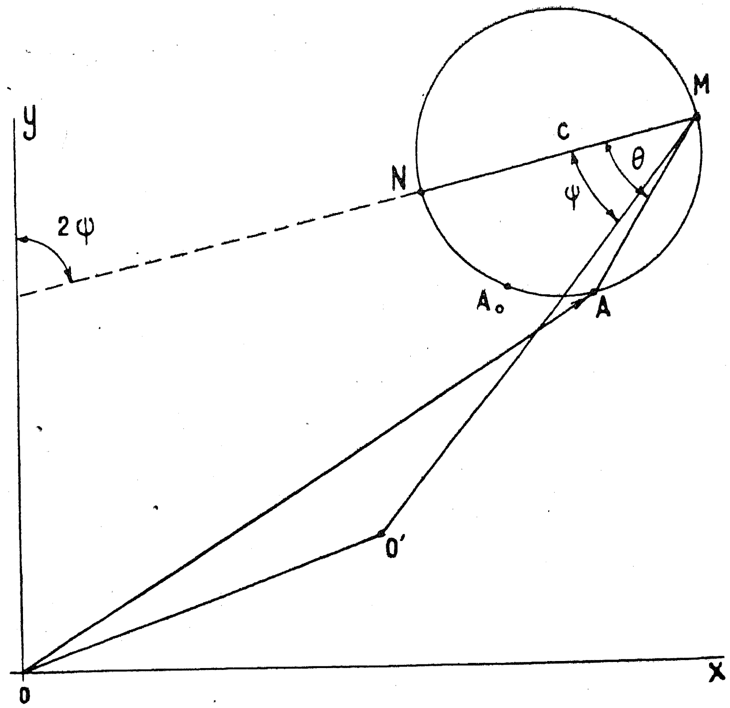


Fig. 6.

trois cordes réunies en parallèle, la chemise de plomb est en court-circuit.

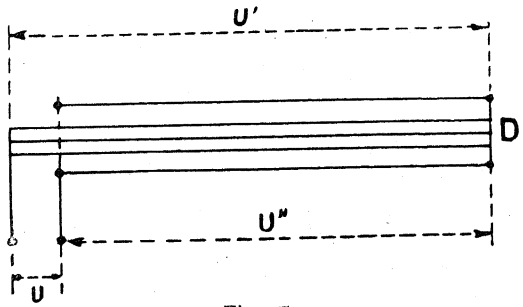


Fig. 7.

Si le courant traversant chaque corde est I, l'impédance apparente mesurée dans ces conditions sera :

$$\frac{U}{I} = Z_{11} - \frac{Z_{12}^2}{Z_{22}}. \qquad (25)$$

Elle est égale à l'impédance limite de l'expression (23) et par conséquent son point figuratif A_0 appartient au diagramme circulaire de la figure 6.

Ce dernier se trouve ainsi complètement déterminé.

Pour chaque régime de fonctionnement, l'impédance totale apparente représentée par le vecteur OA, correspond à un courant I, pénétrant dans le défaut.

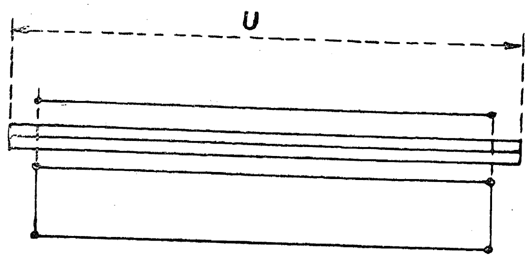


Fig. 8.

La répartition du courant de défaut I, entre l'enveloppe et le sol se trouve également représentée sur l'épure.

Il suffit de poser $I_1 = 0'M$, pour présenter à la même échelle le courant dans l'enveloppe I_2 par le segment 0'A et le courant dans le sol I_3 par le segment AM.

Conclusion et résultats d'essais.

Dans les canalisations souterraines en câble armé, l'impédance symétrique d'ordre zéro, bien que variable avec la résistance du sol, reste comprise entre deux limites assez rapprochées qu'on peut prédéterminer des résultats d'essai en court-circuit sur un échantillon de câble.

L'importance du courant de retour dans le plomb lors d'un défaut à la terre peut être également prévue à l'avance.

Les essais ayant pour but de déterminer les impédances caractéristiques des canalisations souterraines ont été effectués au Laboratoire des recherches des « Câbles de Lyon » de la « Compagnie générale d'Electricité » sur un échantillon de câble triphasé à surfaces équipotentielles obtenues par la métallisation des bourrages.

Le câble soumis aux essais et prévu pour une tension de service de 35 000 V comportait trois conducteurs en cuivre de 150 mm² ; la longueur utilisée était de 200 m environ.

Impédance $Z_d = Zi$. — La mesure de l'impédance directe ou inverse faite en régime triphasé a donné le résultat suivant se rapportant à 1 km :

$$Z_d = Z_i = 0,136 + j0,112 = 0,176 \angle 39°30' \text{ ohms/km.}$$

Impédance Z_0. — Les valeurs limites de l'impédance Z_0 ont été déterminées par deux essais en court-circuit.

Pour $\rho = 0$ (schéma 8), on a obtenu le résultat :

$$Z_0 = 0,837 + j0,145 = 0,85 \angle 9°50' \text{ ohms km.}$$

Pour $\rho = \infty$ l'impédance Z_0 devient :

$$Z_0 = 0,896 + j0,102 = 0,90 \angle 6°30' \text{ ohms/km.}$$

La présence d'un feuillard en acier de perméabilité variable avec le champ magnétique entraîne une légère variation des impédances caractéristiques qui dépendent, dans une certaine mesure, de l'intensité du courant d'essai. Pour les champs faibles, comme ceux qu'on rencontre dans les essais en court-circuit, la résistance efficace et, dans une mesure moindre, la réactance augmentent avec le courant.

Il résulte des essais que l'impédance Z_0 se trouve comprise entre 0,85/9°50' et 0,90/6°30' ohms/km. L'écart entre ces deux limites extrêmes est faible, ce qui indique que le couplage électromagnétique entre la gaine de plomb et les trois conducteurs est serré. On voit en effet que, dans le cas d'un couplage très serré, les deux expressions (24) et (25) se ramènent approximativement à la même valeur égale à :

$$(Z_0)0 = (Z_0) = r_1 + r_2 + \omega(\lambda_1 + \lambda_2),$$

où λ_1 et λ_2 sont les inductances des fuites des deux circuits.

En résumé, dans un câble triphasé armé, le couplage électromagnétique entre le circuit des trois conducteurs et le circuit plomb étant très serré, l'impédance Z_0 devient sensiblement indépendante de la résistance du sol et peut être considérée comme une constante kilométrique. Pour la même raison, lors d'une mise à la terre accidentelle, la plus grande partie du courant de défaut emprunte l'enveloppe de plomb comme conducteur de retour.

Il est donc pratiquement très important d'assurer, avec le plus grand soin, la continuité du plomb dans les canalisations souterraines en câble armé.

ACCIDENTS DE L'ÉLECTRICITÉ

par M. A. Zimmern,

Professeur agrégé de la Faculté de Médecine.
Membre de l'Académie de Médecine.

L'imprudence et l'ignorance. — Les facteurs physiques des accidents : tension, intensité, résistance. — Le facteur psychique. — L'examen d'aptitude. — Iconographie des accidents : par conduction métallique à l'entrée, à la sortie ; par conduction liquide à l'entrée, à la sortie. — Les mesures prophylactiques. — Les théories du mécanisme de la mort et le traitement des électrocutés.

Aperçu étiologique. L'imprudence et l'ignorance

En 1928, à la suite de son rapport annuel, la Commission des accidents du Comité d'Electricité fonctionnant au Ministère des Travaux publics, a émis comme conclusions qu'il y avait lieu pour le Ministre des Travaux publics :

1° de faire publier dans les *Annales des Ponts et Chaussées* et les *Annales des Mines* la statistique des accidents de 1928, en y ajoutant une note succincte qui souligne les accidents les plus fréquents.

2° de demander la même publication aux revues techniques susceptibles de l'insérer (*Revue générale de l'Electricité, l'Electricien, Journal des Electriciens*, etc.).

3° de notifier la statistique et la note annexe aux groupements qui s'occupent de la prévention des accidents électriques (Association française de propriétaires d'appareils à vapeur, Union française pour la prévention des accidents, Société pour le développement des applications de l'Electricité, Société pour le perfectionnement de l'Eclairage, Société de propagande urbaine et rurale pour l'Electricité, etc.).

Cette invitation laisse clairement transparaître qu'on n'est pas en haut lieu sans s'inquiéter très sérieusement de la fréquence et de la répétition des accidents électriques. La statistique de 1928, la dernière publiée, montre en effet, par rapport aux années précédentes, une progression sensible qui n'a évidemment d'autre raison que la prodigieuse extension des réseaux, nécessitée par les besoins sans cesse croissants de l'industrie, de la traction, de l'éclairage et du confort domestique.

Mais cette statistique qui accuse 240 accidents, parmi lesquels 153 mortels, et concerne les accidents survenus le long des lignes qui sillonnent les campagnes ou qui empruntent la voie publique, y compris les postes de transformation, se limite aux distributions d'énergie électrique surveillées par le Ministère des Travaux publics.

Les accidents des centrales, des usines de grande et petite industrie ressortissent à l'Inspection du travail, et sont assujettis à la déclaration obligatoire d'après la loi du 9 avril 1898 sur les accidents du travail. En 1928, il a été ainsi déclaré en France, 1493 accidents, parmi lesquels 121 de mortels.

Au total, pour 1928, on connaît 1733 accidents et 274 morts par l'électricité, *officiellement* enregistrés. Mais ces chiffres sont inférieurs, très inférieurs à la réalité, car restent ignorés des pouvoirs publics, les accidents dans les installations non soumises au contrôle, en particulier toute la série des accidents domestiques de la basse tension, dont la relation ne franchit qu'exceptionnellement le seuil de l'habitation privée.

Deux mille victimes, brûlés, paralysés, etc., et, sur ce nombre, plus de 300 morts, c'est à ce taux que s'élève approximativement en France, pour 1928, la rançon du développement des usages de l'énergie électrique, et, en 1930, ces chiffres ont certainement dû être dépassés.

L'étude des causes occasionnelles des accidents électriques conduit à les distinguer selon leur lieu de production : l'usine génératrice, le réseau de distribution, les locaux d'abonnés.

Dans les centrales, le personnel est soumis à des règlements protecteurs. On lui a appris le danger. Ingénieurs, contremaîtres et ouvriers sont assujettis à la discipline et doivent se surveiller mutuellement. Des affiches, des ordres de service, des notifications, ont pour but de tenir la prudence en éveil. Certaines sociétés productrices délivrent en outre à leur personnel un petit livret individuel, sorte de catéchisme du travailleur électricien, destiné à être lu et relu par l'intéressé et à faire pénétrer ses maximes dans le domaine de l'inconscient.

Aussi l'accident par ignorance est-il rare à l'usine. Si une femme de charge a pu être électrocutée en époussetant une génératrice en action, la faute en est à l'employeur, d'avoir laissé circuler dans ses locaux du personnel étranger non averti, sans le faire accompagner. A l'usine, ce n'est pas d'ordinaire au voisinage de la génératrice dont le ronflement fait respecter les distances que se produit l'accident,

mais au tableau de distribution, dans le département des cellules, car, là, le danger ne se révèle pas à nos sens. Là, c'est l'imprudence, l'entorse aux règlements, la distraction, parfois la stupide fanfaronnade qu'on trouve à l'origine des accidents.

C'est pour avoir, au mépris de toutes les prescriptions, négligé de mettre ses gants ou de se servir de la perche, absente de sa place habituelle, que l'ouvrier se fait électrocuter ; c'est pour avoir passé la main dans une cellule fermée pour la nettoyer ou y rattraper quelque outil ou quelque écrou, que ce manœuvre est profondément brûlé, s'il ne paie pas de sa vie cette infraction au règlement.

Trop souvent, l'ouvrier travaillant auprès des conducteurs sous tension, se fie à la sécurité de ses mouvements. Comme dans les multiples autres professions où la menace du danger se répète chaque jour, la défiance finit par s'émousser. Peut-être même l'insouciance se développe-t-elle encore davantage chez l'ouvrier électricien, vu que son attention n'est pas sans cesse sollicitée par des manifestations objectives d'un dangereux voisinage. Plus d'un, du reste, après avoir été plusieurs fois légèrement choqué ou secoué sans dommage, acquiert le sentiment d'avoir contracté une sorte d'immunité et finit par trouver les prescriptions et les règlements pour lui-même trop sévères. Sa prudence s'allège et, un beau jour, la tension fatale vient le surprendre dans un moment d'inattention.

En nettoyant un transformateur, ganté et monté sur le tapis isolant, mais son dos s'appuyant sur un fer en T relié au sol, un ouvrier touche fortuitement du coude un câble parcouru par un courant de 5 000 V. Ici, ce n'est plus exclusivement à l'inattention qu'incombe la responsabilité de l'accident, mais à une fâcheuse disposition de l'appareillage, dans des locaux sans doute insuffisamment vastes. Les accidents de semblable origine sont évidemment appelés à disparaître, car, dans les centrales modernes, tout est prévu pour la sécurité du personnel : dimensions des locaux de travail, largeur des passages devant les appareils de commande ou de mesure, répartition correcte des prises de terre, etc.

A l'extérieur, des centaines de mille kilomètres de câbles tendent au-dessus de nos têtes un réseau que sa hauteur au-dessus du sol met hors de portée humaine, et dont au surplus, l'approche est dûment défendue par une profusion d'avertissements ostéologiquement illustrés, rivés aux flancs des pylônes ou à la porte des cabines de transformation.

C'est parfois cependant le mince fil de cuivre d'un cerf-volant qui vient dériver la tension à travers le corps d'un enfant, ou bien c'est

au cours d'une tempête un conducteur rompu que la fatalité fait tomber sur la tête de l'innocent promeneur.

Plus souvent l'accident relève d'une inexcusable imprudence. C'est pour gagner un stupide pari ou dénicher quelques jeunes oiseaux, qu'au mépris des herses et des ronces, sourd à la macabre signalisation, le gamin escalade le pylône au sommet duquel court la dangereuse tension.

C'est pour un ordre mal transmis que cet ouvrier, appelé par sa fonction à la réparation d'une ligne, pour laquelle l'interruption de courant aurait dû se poursuivre jusqu'à l'heure H, tombe électrocuté, victime d'un rétablissement prématuré de la tension.

Nombreux sont encore les ouvriers de toutes corporations, maçons, couvreurs, peintres, qui viennent travailler au voisinage des lignes, et que leur employeur aura omis de prévenir avec assez d'insistance que le contact d'un câble peut être fatal. Parfois cependant, le reproche d'imprévoyance ou la responsabilité patronale devient discutable lorsque, comme dans le cas suivant et tout récent, la distance du travail ne semblait imposer aucune précaution. Un ouvrier couvreur avait à poser un chéneau de 3 m. 90 sur le toit d'une maison. Il heurte avec celui-ci un câble de haute tension, pourtant réglementairement distant de 2 m. 50 de l'édifice et tombe foudroyé.

Malgré la surveillance technique sévère qui s'exerce sur les réseaux de distribution aériens, il arrive encore parfois qu'on découvre à l'origine d'un accident, un vice d'installation. Témoin l'électrocution de ce soldat qui, urinant sur le bord d'une route en remblai, à deux mètres d'un pylône, perd l'équilibre et roule vers le pylône. L'enquête démontra que la surface du sol était détrempée par une série d'orages, qu'un isolateur avait été brisé par la foudre, et que la résistance de prise de terre du pylône s'élevait à plus de 3 000 ω, de sorte que la tension vagabondait à la surface du sol. La plaque de terre avait une dimension insuffisante et la région où elle était enfouie était trop sèche.

On lit dans l'arrêté du Ministère des Travaux publics du 30 avril 1927, relatif aux dispositions à prendre dans les distributions à haute tension que les supports doivent porter l'inscription danger de mort, « afin qu'il apparaisse clairement aux yeux de tous que, si le danger de mort est réel et doit être explicitement signalé, il résulte du contact avec les fils ». L'exemple qui précède, comme un certain nombre d'accidents du même genre, dénonce, comme on le voit, la portée trop étroite du texte administratif.

Les cabines de transformation où n'accède que le personnel discipliné des compagnies de distribution restent, malgré cela, le théâtre d'un assez grand nombre d'accidents, à l'origine desquels se retrouve trop souvent la coupable négligence. La sécurité n'est-elle pas suffisante, une fois les couteaux ouverts, pour permettre le travail, sans dérouler le tapis isolant, sans revêtir les gants ?

D'autres fois, dans les cabines, la recommandation de n'avancer qu'à petits pas, en démarche parkinsonnienne, dirions-nous, nous autres médecins, n'est pas observée et la présence de cercles de potentiel autour d'une prise de terre accidentellement devenue inefficace, provoque la chute du compagnon.

Il faut bien reconnaître cependant que l'obéissance la plus stricte aux prescriptions et la maîtrise de soi se laissent parfois trahir par un mouvement irréfléchi. Expert et averti, un vieil ouvrier, monté sur un transformateur au repos pour en vérifier les départs, se redresse brusquement pour en descendre et, dans ce mouvement, vient toucher de la tête le couteau du sectionneur. Sans doute la victime connaissait-elle l'imperfection de l'installation, et aurait-elle dû s'en méfier, mais l'automatisme de son redressement l'emporta en vitesse sur la réflexion.

Si, quittant maintenant le territoire de la haute tension pour entrer dans celui de la basse, pour pénétrer chez l'abonné, industriel grand et petit, usager de la force motrice et de l'éclairage, ainsi que chez le particulier qui, en dehors de l'éclairage, réclame aujourd'hui au courant électrique une infinie variété de services ménagers, on constate que, le plus souvent, l'imprudence dérive d'une étrange méconnaissance du danger.

La basse tension jouit en effet, malgré la fréquence des accidents, d'une considération injustifiée d'innocuité que la lecture d'incessants faits divers, dans les grands quotidiens, n'a pas encore réussi à dissiper.

Comment, du reste, douter de cette innocuité quand les autorités compétentes laissent si largement pénétrer la basse tension dans les habitations et que les compagnies concessionnaires ne font pas la moindre recommandation à leurs abonnés ? Pour toute surveillance ne se bornent-elles pas à la vérification initiale des installations nouvelles, poussant la discrétion et l'indulgence vis-à-vis de l'abonné, jusqu'à n'exercer aucun contrôle sur les modifications plus ou moins fantaisistes qu'ultérieurement celui-ci se plaira à leur apporter. N'est-ce pas là une garantie d'innocuité ?

Comment encore douter de celle-ci, lorsque dans la rédaction d'un acte officiel, comme l'arrêté du 30 avril 1927 on trouve que « les installations usuelles de la 1re catégorie (tension entre conducteurs et terre égale ou inférieure à 250 volts) les accidents se produisent le plus rarement » ?

D'autre part, le défaut d'avertissement sur la basse tension ne s'oppose-t-il pas éloquemment à l'obsédante signalisation du danger au voisinage de la haute ?

Haute tension, danger de mort ! Cette manière d'équation ne suggère-t-elle pas implicitement que la tension ne serait-elle pas si haute, elle serait inoffensive, et ne tend-elle pas à accréditer ainsi la notion inverse de l'innocuité de la basse tension ?

Ce n'est pas du reste seulement dans les rangs du public profane que règne le dangereux préjugé.

L'ouvrier qui cent fois se sera trouvé en contact avec des conducteurs à 110 V sans éprouver autre chose qu'une légère commotion, peut-il faire autrement que d'y souscrire ?

Au risque de m'aliéner la bienveillance des ingénieurs, je dois dire que j'en ai rencontré plus d'un, profondément surpris à l'idée que la haute tension pouvait épargner sa victime, tandis que la basse, au contraire, pouvait être fatale. Il m'est revenu, par exemple, qu'un ingénieur du Contrôle, chargé d'enquêter sur un accident consécutif à la fixation d'un hauban métallique à un boulon de ferrure qui supportait l'isolateur d'une ligne à 230 V. avait conclu, sur la foi des décrets sans doute, qu'en principe, cette tension, qui fortuitement s'était transmise au câble servant de hauban, n'était pas dangereuse. Peut-être est-ce en raison d'une inconscience analogue, que périt cet autre ingénieur en voulant, étant dans son bain, allumer sa cigarette à un radiateur électrique qu'il venait lui-même de construire !

La méconnaissance des dangers de la basse tension est d'autant plus à redouter actuellement, que se multiplient davantage les diverses utilisations domestiques de l'énergie électrique.

Sans parler de l'électrification sans cesse en progression des ateliers de la petite industrie mécanique, voici à titre d'indication un aperçu du développement de quelques applications ménagères et commerciales à Paris, dans ces quatre dernières années.

Appareils de chauffage à air : . . .	7 000	installations
Chauffe-bains et chauffe-eau	1 800	—
Cuisine domestique	1 200	—
Petits appareils domestiques	70 000	—

Si l'on ajoute les appareils de cuisine commerciale, de fours commerciaux, de réfrigération, etc... on arrive au total de plus de 80 000 appareils installés.

Sans doute l'outillage de l'ouvrier et l'appareillage domestique restent-ils inoffensifs, tant qu'il sont en bon état, mais du jour où une détérioration se produit, du jour où un fil se dénude, où une oxydation s'introduit, compromettant l'isolement et mettant la masse sous tension, l'innocuité disparaît.

En négligeant la surveillance de son appareillage, l'ouvrier à l'atelier, comme l'usager à son domicile se trouvent ainsi exposés à l'accident. Et c'est ainsi que s'inscrivent au bilan annuel les nombreux accidents de chignoles, de baladeuses, de fers à repasser, de baignoires, etc...

Le plus grand nombre des accidents de basse tension est dû à la méconnaissance de la dangereuse promiscuité de l'eau et de l'électricité. Insuffisamment instruit du rôle de la conductibilité, le profane ignore que le danger est au sol, surtout au sol humide et il n'ignore pas moins que les canalisations de gaz et d'eau en prolongeant électriquement le sol jusqu'à sa portée, constituent une menace permanente.

Défectuosités d'installation et d'appareillage, imprudence et ignorance représentent donc la triade étiologique dominante des accidents de l'électricité. La première rubrique trouve aisément remède dans les progrès de la technique et la surveillance du matériel. L'imprudence réclame une observance toujours plus étroite chez le professionnel et quant à l'ignorance, elle sera le mieux combattue par la plus large publicité possible donnée à tout nouveau méfait de l'électricité.

A ces causes fondamentales vient encore cependant s'allier assez souvent la part de l'imprévu : d'une part celle de l'imprévu lié au concours fortuit et complexe de circonstances matérielles, de l'autre celle de l'imprévu fonction de notre psychisme individuel : on ne saurait penser à tout.

Voici par exemple un ouvrier plombier auquel on a commandé de déplacer dans la cave une volumineuse cuve en zinc devant servir de réservoir et dont la hauteur atteint presque celle de la voûte. Sous celle-ci courent deux fils de basse tension. S'aidant de son cric et sans se douter un seul instant du danger, auquel il n'est nullement préparé par son métier, le plombier élève la lourde masse et, lorsque celle-ci, par sa face supérieure vient écraser les fils contre la voûte, il tombe électrocuté. Des cas de ce genre n'excusent évidemment pas l'imprévoyance, mais se laissent beaucoup plus aisément commenter *a posteriori*.

Les facteurs physiques des accidents

1. — *La tension.*

Nous venons de dénoncer l'influence fâcheuse que nous semblait avoir sur l'opinion publique l'exclusivité de la signalisation des dangers de la haute tension. D'un autre côté, la répartition officielle des exploitations électriques en catégories, selon la hauteur du voltage, avec leur réglementation de sévérité croissante, ne paraît pas moins apte à entretenir chez les professionnels le sentiment d'un accroissement du danger avec le voltage.

Il n'est pas jusqu'aux rapports d'expertises ou aux actes administratifs qui, ne pouvant nécessairement mentionner que la tension, seule référence électrique connue *a priori* et invariable, laissent ainsi l'impression d'une relation de proportionnalité entre la tension et la gravité des accidents. Or celle-ci n'est pas en principe une fonction croissante du voltage.

Sans doute une certaine proportionnalité peut-elle exister, mais elle n'est nullement nécessaire. On peut échapper à la mort en haute tension et être électrocuté avec moins de 110 V.

Il serait même plus conforme à la réalité de dire que les courants de haute tension sont moins souvent mortels que ceux de basse tension. Il semble bien, en effet, qu'à nombre égal d'accidents dans les deux catégories, tandis que la basse tension se montre le plus souvent fatale, la haute tension épargne bien des fois sa victime, ne lui infligeant que des brûlures plus ou moins étendues, plus ou moins profondes, des lésions de choc plus ou moins immédiates, plus ou moins persistantes (paralysies motrices, sensitives, etc.) Telle est du reste la raison pour laquelle les électrocutions pénales américaines, après avoir au début été essayées avec la haute tension et n'avoir pas toujours été efficaces, n'avoir le plus souvent provoqué que des brûlures, se pratiquent aujourd'hui sous des tensions de 3 à 400 V avec 200 mA environ.

Cette différence dans les effets respectifs de la haute et de la basse tension, est évidemment d'ordre physiologique.

A ne considérer que les accidents de basse tension, en entendant par basse tension les tensions à usage domestique ou industriel admises dans les habitations sans prescriptions de garde, le rapport de proportionnalité existe et le danger est forcément plus grand avec 220 V qu'avec 110 V.

Si l'on admet, d'après des chiffres dont on trouvera plus loin la justification, que l'intensité minima dangereuse en alternatif est aux environs de 0,025 A et que la résistance, dans des conditions particulièrement défavorables, entre les mains humides par exemple, est de 2 000 ohms, le voltage dangereux le plus bas ressortit à

$$0{,}025 \times 2\,000 = 50 \text{ V}.$$

Aussi a-t-on été conduit à proposer, pour réduire les risques dans certaines manipulations plus particulièrement dangereuses, l'abaissement local de la tension à moins de 50 V.

En appliquant le petit calcul précédent au cas d'un organisme plongé dans une baignoire, on verrait, en estimant la résistance globale à 750 ohms, que le danger commence avec 20 V.

II. — *L'intensité.*

En fait, chaque accident est une résultante. Il est issu du concours d'un certain nombre de facteurs à la fois physiques, physiologiques et psychiques.

Parmi les premiers, le facteur dominant est, non la tension, mais l'intensité. Le fait de cet ingénieur se vantant d'avoir pu à diverses reprises toucher un câble parcouru par un courant de 2000 V n'a rien de surprenant. On est tué non par des volts, mais par des ampères : ce qui ne signifie pas du reste, ici non plus, que la gravité des accidents soit nécessairement liée à l'intensité par un rapport de proportionnalité. Il est d'abord un ordre de grandeur de l'intensité dont l'innocuité au point de vue vital est démontrée par les applications de l'électrothérapie. Cinquante milliampères en courant continu, huit à dix millis en alternatif, sont des intensités quotidiennement utilisées en médecine et couramment considérées comme de tout repos. Où commence donc le danger? A quel seuil, à quelle intensité liminaire correspond la première menace d'une altération fonctionnelle ou d'une désorganisation des tissus ?

S'adresser à l'animal pour répondre à cette question serait temps perdu. L'animal, en effet, est incapable de nous éclairer parce que l'on sait pertinemment par les observations faites sur le bœuf, le cheval, le chien que la sensibilité de chaque espèce, vis-à-vis du courant électrique, est très inégale et plus ou moins éloignée de celle de l'espèce humaine.

Pour résoudre le problème chez l'homme, les ingénieurs ont maintes fois entrepris des expériences, non pas bien entendu des expériences

radicales, mais des essais de tolérance sensitive à l'action du courant en le faisant passer de bras à bras par exemple. Constatant que la vigoureuse poignée de mains du secteur commençait à devenir insupportable à 25 mA, ils se sont cru autorisés à en déduire, par une sorte d'extrapolation, que le seuil de l'intensité dangereuse devait être voisin de 25 mA en alternatif. En continu, l'équivalence serait entre 50 et 100 mA.

Mais ces chiffres, même comme moyennes ou comme éléments de probabilité ne nous satisfont pas. JELLINEK assure que dans beaucoup de cas d'électrocution, l'intensité n'a pas dû dépasser 10 mA.

En prenant une autre porte d'entrée que les mains, il faut s'attendre à trouver d'autres valeurs. Si l'accès de l'organisme se fait par les pieds par exemple, c'est-à-dire si le circuit se ferme par les membres inférieurs, n'abandonnant aux organes nobles du névraxe ou de la cage thoracique qu'une faible densité de courant diffusé, la réaction sensitive locale apparaîtra peut-être aussi tôt, mais l'intensité léthale sera vraisemblablement plus élevée.

Il est évident, par ailleurs, que la corpulence, la taille, l'âge doivent modifier dans une mesure appréciable le seuil de nocivité. Chez l'enfant, le seuil s'abaisse sans doute plus fortement qu'on ne pourrait le croire, car plusieurs fois, chez des enfants en bas âge, sans manifestation cardiaque ni lésion thymique perceptible, j'ai vu l'application de courants thérapeutiques très faibles, courant continu à 2 ou 3 milliampères, dirigés à travers le thorax, provoquer des accidents syncopaux.

Enfin, si, comme nous le verrons plus loin à propos des mécanismes supposés de la mort par l'électricité, chacune des théories, théorie de l'inhibition respiratoire, théorie de la tétanisation thoracique, théorie de la fibrillation cardiaque, contient, comme cela est fréquent dans les théories physiologiques, une part de vérité, il ne paraît pas vraisemblable qu'à des mécanismes si différents puisse correspondre la même valeur de seuil.

Mais voici, tiré de la pratique électrothérapique, encore un autre argument.

Pendant la guerre, contre certaines psychoses du moment, on s'est servi d'une méthode de persuasion armée, dénommée torpillage et qui consistait à violenter la sensibilité du sujet avec le courant de la bobine faradique, courant à ondes aiguës mais de très faible intensité. Dans le même but, en Allemagne, on a eu recours à un procédé en principe analogue, l'« Ueberrumpelungsverfahren » de KAUFFMANN, mais où

l'appareil générateur, malgré sa désignation de faradique, n'était autre chose qu'un petit alternateur pouvant donner 60 V et débiter des milliampères. Or les effets physiologiques de ces deux formes de courant sont dissemblables et cet alternatif, aux intensités où on l'utilisa, provoqua de nombreuses syncopes mortelles qui obligèrent à renoncer à la méthode. Avant la guerre du reste, même sans avoir recours à la technique militaire et brutale de KAUFFMANN, on eut, avec ces appareils, à déplorer des cas de mort subite sous des intensités inférieures à 10 milliampères. JELLINEK a rapporté le cas d'un enfant auquel on appliqua cette faradisation sinusoïdale pour une paralysie du bras. Comme il se montrait un jour particulièrement indocile et répandait d'abondantes larmes, le médecin, en manière d'exhortation amicale, lui tapota la joue avec l'une des électrodes. Il s'ensuivit une syncope mortelle qui fut attribuée à un accroissement d'intensité due à la bonne conductibilité lacrymale.

Ces tragiques dénouements, particulièrement troublants, suggérèrent l'hypothèse de lésions préexistantes, méconnues ou dissimulées. On connaît des cas de mort subite, sans parenté aucune avec les accidents électriques, et qui ont paru assez souvent dépendre d'un état constitutionnel spécial en relation avec des altérations du système lymphatique et un trouble de fonctionnement du thymus. Aussi a-t-on invoqué la prédisposition lymphatico-thymique pour expliquer les accidents qui viennent d'être rapportés. Dans un ordre d'idées tout voisin, et en faisant appel aux conceptions physiologiques les plus récentes, qui pourrait dire du reste si le tonus du système neuro-végétatif, si varié avec les individus, n'intervient pas, comme cause prédisposante, dans une très large mesure?

De toute façon, ce qui semble bien ressortir de l'ensemble des considérations qui précèdent, c'est l'écart que diverses conditions biologiques, âge, race, constitution, susceptibilité individuelle, mode d'atteinte de l'organisme par le courant, etc, sont capables d'apporter à la fixité des valeurs nocives de l'intensité. Il ne semble donc pas possible, en raison de ces variations, même chez les individus sains, de coter l'intensité mortelle.

Et si j'ai quelque peu insisté sur les influences constitutionnelles qui viennent d'être esquissées, c'est que j'y vois un sérieux argument pour décider les chefs d'entreprise à subordonner l'embauchage de leur personnel à un examen médical d'aptitude.

III. — *La résistance.*

Par sa résistance plus ou moins élevée, la peau ou, avec une précision plus anatomique la couche cornée de l'épiderme, exerce vis-à-vis du courant électrique comme vis-à-vis de tous les agents extérieurs un rôle de protection, mais une protection variable.

Entre des mains calleuses à couche cornée épaisse, la résistance cutanée peut dépasser 100 000 ohms. Mais elle tombe à des valeurs inférieures quand le tégument n'a qu'une faible épaisseur, quand il est humide et, dans ce dernier cas, suivant la nature et la concentration en ions de la solution qui le mouille. La valeur la plus basse que l'on ait obtenue en alternatif est de 1 000 ohms. Elle correspond à la résistance prise entre les paumes lorsque celles-ci, avec les électrodes afférentes, sont imprégnées d'un bon électrolyte. Avec des électrodes de 10 cm^2, par sa méthode de substitution, Vigouroux a pu établir que la résistance de dos à poitrine est d'environ 4500 à 3500 ohms en continu, ce qui ferait, en alternatif 50 périodes, moins de 1500 ohms.

Pour illustrer les variations de la résistance avec les conditions d'accès du courant à l'organisme, nous emprunterons à Weber les résultats que cet auteur a fait connaître dans un travail assez récent. Les mesures de cet auteur ont porté sur la résistance globale du circuit contenant l'organisme, c'est-à-dire les résistances à l'entrée et la sortie, résistance instrumentale comprise, augmentées de la résistance propre du corps. En utilisant des électrodes de 2 cm de diamètre, serrées dans les mains, et en soumettant le sujet au maximum d'intensité tolérable, Weber est arrivé aux valeurs suivantes :

courant de 14 mA, mains sèches : 5 740 à 2 150 ohms;

courant de 14 mA, mains humectées d'eau de pluie : 3 200 à 1 800 ohms;

avec les mains imbibées d'une solution de soude, il ne fut pas possible de dépasser 10 mA et les valeurs trouvées s'étagèrent entre 2 400 et 1 380 ohms.

Ces différences de conductibilité expliquent sans difficulté pourquoi des ouvriers d'exploitations électriques, après avoir maintes fois touché un conducteur sans ressentir autre chose qu'une commotion, se trouvent un beau jour électrocutés pour avoir touché ce même conducteur dans des conditions en apparence identiques. Un lavage préalable ou encore un accroissement imperceptible de la sécrétion sudorale auront pu suffire pour faire tomber la résistance à une valeur dangereuse.

La valeur limite de la résistance au-dessous de laquelle le courant commence à devenir dangereux apparaît comme des plus simples à calculer et c'est ce que l'on a fait en portant, (à l'encontre cependant de la thèse que nous venons de soutenir sur la fixité de l'intensité liminaire), aux environ de 0,025 A, la frontière de l'intensité dangereuse.

Sous 110 volts, un débit de 0,025 A correspond à une résistance de

$$R = \frac{E}{I} = \frac{110}{0{,}025} = 4400 \text{ ohms.}$$

Par conséquent, tant que la résistance reste supérieure à 4400 ohms, l'intensité nocive ne peut se développer et il ne saurait de la sorte y avoir de danger.

Mais j'avoue très sincèrement ne pas m'en laisser imposer par la puissante séduction des chiffres, même au titre d'une simple probabilité. Viendrait-on en effet, à m'assurer que ma résistance dépasse 5000 ohms, que la démonstration mathématique la plus éclatante n'aurait pas raison de moi et je me garderai prudemment d'entrer en contact avec la tension.

Ce ne serait plus cette fois du reste par scepticisme vis-à-vis des valeurs d'intensité admises comme non dangereuses, mais parce que, en matière d'accidents électriques, tout ne se ramène pas à de purs éléments physiques, qu'il faut compter avec l'influence des éléments biologiques qui peuvent les modifier et qu'enfin se surajoute encore un mystérieux facteur psychique qui, lui, ne se laisse pas chiffrer.

Le facteur psychique.

Il est, en effet, bien avéré que l'état psychique du sujet à l'instant de l'accident peut avoir une importance considérable.

L'attention joue le rôle d'une défensive, et peut atténuer l'effet nocif du shock, même l'annuler complètement. Par contre, la surprise joue un rôle défavorable. Un contact auquel on ne s'attend pas est plus dangereux qu'un contact auquel on s'attend. Les insuccès des premières électrocutions pénales américaines ont été précisément attribués, au moins pour une part, à ce fait que le condamné s'attendait sur la chaise fatale à la violente secousse qui devait l'emporter.

Les sujets hyperémotifs, les « sympathicotoniques » sont évidemment de grands prédisposés.

On a dit que la peur diminuait l'aptitude du système nerveux à réagir contre le shock. La vérité est peut-être que certains accidents mortels attribués à l'électricité peuvent n'avoir été autre chose que des

morts subites, simplement occasionnées par la peur. Il en est des cas authentiques, témoin l'histoire de cet ouvrier racontée par JELLINEK, qui, ayant, plusieurs fois déjà, fait malencontreusement connaissance avec la tension, toucha un jour un câble où ne passait pas de courant et s'affaissa subitement.

C'est l'analogue du cas classique de Verneuil, de ce malade qui mourut subitement au moment où le maître, expliquant l'opération qu'il allait entreprendre, traçait avec l'ongle sur sa peau l'endroit où il se proposait de faire l'incision.

La fatigue, la faim jouent encore un rôle indiscutable.

Le sommeil crée vis-à-vis du courant électrique une sorte d'immunité, ce qui semble assez contradictoire avec ce qui vient d'être dit du rôle de l'attention. Expérimentalement, lorsqu'on soumet des lapins chloroformés à l'action de forts courants, on constate que ceux-ci supportent parfaitement le shock tandis que les témoins non chloroformés sont foudroyés. De même on a vu souvent des dormeurs, frappés par la foudre sous des arbres ou dans leur lit, se réveiller sans autre dommage que quelques brûlures. On cite encore le cas de deux ouvriers qui, endormis au voisinage de conducteurs transportant 20 000 V, entrèrent au contact de la tension par rupture d'un câble et se réveillèrent simplement étourdis et avec quelques brûlures.

Il se pourrait qu'ici les ohms reprennent leurs droits et que ce curieux phénomène comporte une explication réellement objective. De nombreux physiologistes ont, en effet, pu mettre en évidence l'élévation de la résistance cutanée pendant le sommeil. L'illustre physiologiste anglais WALLER trouva déjà sur lui-même que la résistance du corps au réveil le matin était beaucoup plus grande que la nuit précédente, et ses compatriotes, CHAMBERS et FARMER, expérimentant sur une série d'étudiants, trouvèrent chez ceux-ci un accroissement moyen de la résistance de 50 000 à 500 000 ohms. Ces résultats ont été confirmés par RICHTER qui donne pour la résistance de paume à paume 70 000 ohms à l'état de veille, et un chiffre double pendant le sommeil. Celui-ci varierait même avec l'intensité du sommeil. Enfin la narcose chloroformique déterminerait des effets similaires.

L'EXAMEN D'APTITUDE.

Si, comme il a été dit plus haut, les chefs d'entreprises prenaient le parti de faire subir à l'entrée un examen d'aptitude, les conditions d'admission devraient tenir compte à la fois de l'état physique et de l'état psychique du candidat.

Certaines industries électriques exercent bien une sélection, mais celle-ci, au même titre que dans d'autres grandes industries, se limite aux infirmités ou aux troubles assez sérieux pour diminuer la capacité de travail (tuberculose, lésions cardiaques, paralysies, hernies, acuité visuelle, etc.). L'élimination pour raisons de prédisposition aux accidents d'électricité n'existe pas encore.

Sa place n'est pas du reste à l'entrée de l'usine, mais à l'entrée de l'école professionnelle, pour éviter aux jeunes gens de s'engager dans une carrière pour laquelle ils ne seraient pas adaptés. L'examen à l'usine ne devrait être qu'une vérification.

On a prétendu qu'une pareille mesure ne pouvait reposer que sur des bases assez hypothétiques et que si l'on voulait tenir compte de tous les facteurs de prédisposition, cela pourrait entraîner fort loin. C'est ainsi que Schridde qui a déjà, en 1925, appelé l'attention sur ce problème, ayant examiné 37 individus, n'en a pu découvrir qu'un seul franchement normal, ce qui fait songer à certaine définition de l'état de santé de la comédie satirique contemporaine.

Mais, sans pousser les choses à l'extrême, il est des éliminations qui s'imposent. La sécrétion sudorale exagérée, notamment à la face interne des mains (hyperhydrose), l'état de moiteur habituel qui fait souvent partie des troubles basedowiens mêmes frustes, constituent en raison de la diminution de résistance cutanée, une infériorité qui oblige à écarter les sujets qui en sont affectés.

Pour ne pas s'encombrer d'individus susceptibles de perdre la maîtrise d'eux mêmes, on aura encore à éliminer les frustes, les alcooliques, les névropathes, plus particulièrement les hyperémotifs.

Pour des raisons constitutionnelles enfin, on refusera les sujets présentant des troubles fonctionnels du cœur, et il serait désirable qu'on puisse appliquer le même veto au tempérament thymo-lymphatique. Mais il faut savoir que le diagnostic des états de ce genre est bien difficile à poser.

Iconographie des accidents.

Il est des accidents dont le déterminisme apparaît à l'analyse si complexe, si inattendu, si enchevêtré qu'ils échappent à une explication immédiate et déroutent les compétences techniques les plus éclairées. Mais ce n'est pas le cas habituel.

Sous une infinie variété apparente, les accidents de l'électricité se rééditent presque toujours avec une certaine similitude dans leurs

circonstances productrices. Presque toujours on retrouve à leur origine une éventualité matérielle principale qui, favorisant la conductibilité, laisse se développer l'intensité léthale.

C'est ce que nous avons cherché à mettre en évidence dans les exemples qui vont suivre et ce qui nous a conduit à cet effet à grouper séparément les accidents par conduction solide et les accidents par conduction liquide.

1° *Accidents par conduction métallique à l'entrée.*

La plupart des accidents de *haute tension* sont des accidents par contact métallique à l'entrée du courant. C'est le cas banal du professionnel, de l'ouvrier électricien qui par inadvertance, en passant sous une pièce sous tension ou en se relevant sous une barre, vient heurter celle-ci de la tête. Dans ces conditions les cheveux et le cuir chevelu sont instantanément brûlés par l'arc sur une étendue plus ou moins grande, et la barrière protectrice tégumentaire ayant cédé, la mort est à peu près immédiate. La chute fortuite d'un conducteur aérien par temps d'orage sur la tête d'un passant est un accident similaire.

Les mains constituent une porte d'entrée redoutable, non pas seulement à cause de leur grande surface relative et de leur moiteur. mais à cause de la contraction musculaire qui agrippe la victime sur le conducteur. En touchant à pleine main une carcasse, un bâti dont la mise à la terre est devenue inefficace, un ouvrier, s'il n'a pas été immédiatement électrocuté, peut parfois s'en détacher, mais il n'en est pas de même du gamin chasseur de nids qui, parvenu au faîte du pylône et, menacé de perdre l'équilibre, se rattrape à l'un ou aux deux conducteurs.

Il est de la plus grande imprudence de laisser évoluer des ouvriers au voisinage des lignes aériennes avec des objets métalliques susceptibles dans un mouvement inconscient ou réflexe, de prendre contact avec la tension. C'est le cas du manœuvre qui porte sur l'épaule et entoure de son bras un long tube Bergmann ; c'est celui du chauffeur de locomotive qui, monté sur son tender, atteint avec sa longue pelle le câble de la traction électrique ; c'est le cas cité plus haut du couvreur qui, avec un long chéneau en zinc, vient se raccorder malencontreusement à la tension.

C'est encore par la main que pénètre la tension chez l'enfant qui, pour se balancer, saisit un fil de terre arraché, chez le promeneur ignorant qui, sur la voie publique, veut écarter un fil tombé à terre, acte toujours dangereux même si l'on prend des précautions d'isole-

ment, car un fil propulsé peut rebondir. Il en est de même du jeune garçon qui, tirant sur un cerf-volant tombe mortellement frappé au moment où sa corde de laiton s'embarrasse dans les fils aériens.

Ajoutons que ce mode de contact, un fil de fer lancé sur une ligne à 15 000 V, aurait été utilisé comme procédé de suicide.

On a eu plus de sourire que de commisération à l'époque, à Paris, pour ce pompier qui, étant monté sur le toit des Folies-Bergères où ne l'appelait nullement son service, tomba sur l'une des sorties d'un transformateur de 9 000 V destiné à l'éclairage au néon et paya de sa vie une curiosité libidineuse.

A personne certainement ne viendrait l'idée de placer dans un centre d'activité un transformateur de 10 kilowatts avec ses départs et son uilisation. C'est cependant dans une semblable ambiance que travaillent les médecins radiologistes. Leur sécurité dépend de la perfection de l'installation et de leur prudence, mais ils sont à la merci de l'imprévu. Qu'ils empoignent un fil qu'ils croyaient déconnecté ou qu'un fil se détache, mettant la masse d'un support d'ampoule sous tension, l'accident surgit. C'est dans des conditions de ce genre qu'en saisissant la poignée métallique de son châssis radioscopique, le jeune radiologiste J... fut, il y a peu d'années, précipité à terre, mortellement frappé.

En basse tension, la porte d'entrée cranienne ne se rencontre guère que dans les mines où la faible hauteur des galeries expose le mineur debout sur un wagonnet à prendre contact avec le trolley.

Le courant peut pénétrer par d'autres régions et l'on se souvient encore de cette jeune artiste qui, vêtue d'une robe de lamé et attendant son entrée en scène, fut grièvement brûlée pour s'être appuyée sur une prise de courant fixée à un portant. Mais c'est beaucoup plus souvent la main qui constitue la porte d'entrée fatale, avec d'autant plus de risques que la prise sera plus large. On connaît la sinistre plaisanterie de ce charron qui, ayant constaté sur lui-même les secousses que provoquait un conducteur tombé à terre, conçut l'idée d'un bon tour à jouer à ses amis et l'attacha au bouton de sa porte. Quelques-uns s'en tirèrent avec la commotion attendue, mais un militaire à la main sans doute moins calleuse fut électrocuté.

Les appareils de travail qu'il faut prendre à pleine main sont fréquemment, par suite d'un défaut d'isolement, la cause d'accidents mortels. Il en est ainsi des perceuses, des hâveuses, des perforatrices, des chignoles, etc., qui n'ont pas encore cessé de faire des victimes.

Des remèdes pratiques ont été proposés pour enrayer ce genre d'accidents, la mise à la terre de la masse par un troisième conducteur, la réduction de la tension par un petit transformateur, la substitution de l'air comprimé à l'énergie électrique. Les constructeurs tendent de plus en plus à présenter à leur clientèle des appareils qui tiennent compte de ces modifications indispensables, mais qui, malheureusement, ne se propagent pas suffisamment vite, eu égard à l'ignorance de la clientèle, qui n'en perçoit pas toute l'opportunité et n'en voit que le coût.

La surface de contact peut parfois se réduire à celle des doigts, mais il s'agit alors presque toujours d'un double contact.

Plus d'une fois un ouvrier a ainsi dérivé la tension à travers son corps en touchant simultanément les deux bornes d'un récepteur en fonctionnement. Un manœuvre fut ainsi électrocuté en voulant remettre en marche un moteur qui avait été arrêté pendant un orage. Le même accident a pu se produire avec un simple ventilateur.

Enfin je puis citer le cas de cet ouvrier qui pour remplacer une grosse lampe de 500 W, 220 V, saisit la lampe d'une main et la douille de l'autre, poussa un cri, fut pris de contractions et ne put être rappelé à la vie.

Il est des cas où la main rencontre la tension en plein sol. C'est ainsi que succomba un terrassier qui, ayant à enfoncer un pieu métallique dans un trottoir, l'amena malencontreusement au contact d'un câble dont il ignorait l'existence. Cet accident trouve une réplique amusante dans l'aventure survenue aux portes d'une grande ville du nord à l'éléphant d'une ménagerie. Pour lui donner quelque liberté, son cornac l'amena sur un terre-plein et, pour l'attacher, fixa dans le sol un grand piquet relié à une chaîne qui passait en collier autour de son cou. Immédiatement l'animal, fort doux d'habitude, donna des signes d'agitation intense qui ne cessèrent que lorsqu'on le détacha. Le pieu avait rencontré une ligne électrique, et c'est à son rang de pachyderme, c'est-à-dire à sa résistance cutanée particulièrement élevée qu'évidemment l'animal dut son salut.

A propos de ces accidents du sol, je rappellerai une fois de plus qu'au voisinage des prises de terre, un isolement insuffisant, un accident matériel fortuit peuvent mettre le sol sous tension, et exposer à poser le pied chaussé de souliers à clous ou humides sur une surface électrisée.

2° *Accidents par conduction métallique à la sortie.*

La dérivation au sol par conduction métallique ne constitue une sortie dangereuse que si l'adhésion du métal réalise une bonne terre et que la surface de contact avec l'organisme présente une étendue suffisante.

C'est ce qui peut se produire par exemple si un conducteur de terre est pris à pleine main. On trouve encore de ci de là, chez les particuliers à des installations anachroniques, des lampes électriques accrochées à d'anciennes suspensions à gaz. C'est pour en avoir ignoré le danger qu'un instituteur, cité par JULLIARD, de Genève, trouva la mort au moment où, monté sur une table et tenant la douille d'une lampe qu'il voulait changer, il s'accrocha au tuyau de gaz pour maintenir son équilibre.

J'ai cherché à attirer l'attention sur le danger que présentent pour les enfants, notoirement plus sensibles à l'action du courant, certains jouets électriques, petits chemins de fer par exemple, fonctionnant sans transformation sur le voltage du secteur et cela même dans les pièces nobles et non humides des appartements. Il suffirait d'un contact malencontreux de l'enfant, par l'une des mains ou le mollet à nu par exemple, avec une conduite de gaz ou de chauffage, pour déterminer pour le moins une brûlure. En Allemagne, les prescriptions des syndicats de l'électricité imposent aux constructeurs de ne pas dépasser 30 V pour l'alimentation des jouets électriques.

Pour la sortie par les membres inférieurs, l'état de la chaussure a la plus grande importance. Des semelles sèches et épaisses peuvent opposer une résistance de plus de 50 000 ohms, mais avec des semelles usagées, garnies de clous ou humides, toute protection disparaît.

C'est sans doute pour un de ces motifs que fut électrocuté ce marin de cuirassé, simplement en voulant changer une lampe, d'autant que le pont métallique d'un tel bâtiment représente la meilleure des terres.

Les énormes chances de contact que crée l'étendue des masses métalliques au sol expliquent les « classiques » accidents de chaudière encore toujours au premier rang des statistiques. Un ouvrier chargé de nettoyer l'intérieur d'une chaudière y pénètre avec une baladeuse d'un modèle vétuste et dont quelque part, par l'usage ou défaut de surveillance, l'isolement est devenu défectueux. De toute part « la terre » l'environne. Fatalement le contact se produit et il est électrocuté.

Tout récemment, à Innsbruck, un ouvrier appelé à réparer l'intérieur d'une chaudière de chauffage central y tomba foudroyé au moment où il cherchait, en l'entourant de son bras, à détacher une conduite d'arrivée d'eau. Le courant avait pénétré par la joue sur laquelle avait dû porter le panier de la baladeuse, comme l'attestait l'aspect quadrillé des brûlures constatées en cette région.

3° *Accidents par conduction liquide à l'entrée.*

Avant d'aborder les accidents par conduction liquide, je voudrais signaler quelques faits curieux où la tension traversa au préalable un conducteur organique animal.

Aux abattoirs, un chargeur portait sur sa tête une volumineuse pièce de viande. Il heurta au passage la lyre d'une lampe à arc et tomba électrocuté.

Dans une étable, un fermier était occupé à traire sa vache. Tout à coup vache et trayeur tombèrent inanimés. D'un coup de queue la vache avait atteint une colonne en fonte contre laquelle passait un fil d'éclairage dénudé.

Plusieurs fois du reste des animaux ont été électrocutés dans des écuries ou des étables, la surveillance des installations dans ces locaux n'étant pas précisément toujours très étroite. On a signalé récemment l'électrocution de huit vaches dans une seule étable, parce que des fils d'éclairage mal isolés étaient venus au contact de leur mangeoire.

La conduction liquide, en abaissant la résistance d'entrée du courant ou en rendant plus efficace la terre à la sortie, est à la source d'une quantité d'accidents qui en grande majorité sont des accidents de *basse tension.*

Le type d'accidents par conduction liquide à l'entrée, serait représenté par les accidents des pompiers si leurs manœuvres n'étaient pas rigoureusement réglementées.

La projection de la colonne liquide sur un appareil sous tension met en danger le pompier qui tient la lance dans ses deux mains fermées et mouillées. Aussi est-il interdit de jeter de l'eau sur les conducteurs ou appareils à haute tension et recommandé, en attendant l'interruption du courant par les agents des centrales, de combattre le feu avec du sable ou de la terre que l'on jette à la volée.

On a cherché à déterminer la distance de protection du pompier porte-lance par rapport à la tension. Les expériences faites avec un jet d'eau d'un diamètre de 12 mm. et à la pression de 13 kg par cm^2, ont montré qu'en courant continu 500 V, un choc n'était ressenti

qu'à 6 cm et en alternatif de même voltage déjà à 19 cm. Pour un voltage de 3 600, le choc peut être senti à 3 mètres, et les voltages supérieurs seraient donc particulièrement dangereux.

La composition de l'eau et notamment l'acide carbonique dissous augmenteraient du reste notablement la conductibilité de l'eau.

Bien des observations montrent que, pour favoriser la conductibilité, la masse liquide n'a pas besoin d'être très considérable. Une très bonne conductibilité peut être provoquée simplement par l'humidité. JELLINEK met en garde contre le simple contact de la main humide avec l'ampoule de verre des lampes à incandescence qui peut être recouverte de poussières conductrices ou d'un mince enduit de produits d'oxydation. Il relate à cet égard l'histoire d'une femme de ménage qui, les pieds nus sur le sol humide de la pièce qu'elle nettoyait, tomba foudroyée en touchant le verre de l'ampoule d'une lampe à incandescence. L'accident s'expliqua par des éclaboussures de lait de chaux qu'utilisait la victime dans son travail et grâce auxquelles la tension avait pu passer de la douille à la surface du verre.

La conduction liquide à l'entrée peut reconnaître une cause toute physiologique. Tout contact métallique par exemple aura sa résistance notablement abaissée par la transpiration d'autant que celle-ci peut être assez riche en chlorure de sodium, ou comme chez certains ouvriers manipulant des substances chimiques, chargée de produits électrolytiques incrustés dans les conduits glandulaires cutanés.

La salive peut également par sa conductibilité améliorer un contact métallique. Le fait-divers suivant en est un exemple.

Une maman avait l'habitude de chauffer le lait destiné à son bébé dans une bouilloire électrique. Celle-ci était reliée à la prise murale de courant par un fil souple, coiffé à l'extrémité opposée de deux embouts en ébonite, ayant sensiblement la forme d'une sucette. Un jour, ayant détaché la bouilloire sans avoir déconnecté la prise murale, la mère laissa par inadvertance traîner les deux conducteurs sur le berceau de l'enfant et s'éloigna un instant. Au retour, elle trouva l'enfant ne respirant plus, tenant dans une main l'un des embouts, et l'autre entre ses lèvres. Heureusement que le retour de la mère s'effectua assez tôt, car, grâce à secousses et fessées, l'enfant fut rappelé à la vie, et ne garda de son accident que quelques brûlures à la lèvre.

Enfin il faut savoir que bien souvent l' « acte mictionnel » a pu être la cause d'accidents mortels tout à fait inattendus, l'entrée du courant se faisant par la veine liquide.

Pour s'amuser, un pompier urine sur une batterie d'accumula-

teurs en charge, un manœuvre exécute la même opération sur un transformateur. Du haut d'un pont sous lequel passent les trolleys d'un chemin de fer électrique à 15 000 V, un enfant essaye son adresse en s'efforçant d'atteindre le fil et tombe inanimé. Accident semblable chez ce militaire qui dans le même but s'arrête auprès d'un pylône dont l'isolement était défectueux. Pendant la guerre, des soldats trouvèrent la mort dans des conditions identiques le long de clôtures en barbelés dont le rôle défensif avait été intensifié par raccordement avec un réseau à 1 500 V.

4° *Accidents par conduction liquide à la sortie.*

A la sortie, le contact liquide ou humide, réalisant les conditions d'une bonne terre, réalise aussi le maximum de danger.

La cave, au sol toujours humide et où l'éclairage artificiel est indispensable, offre aux accidents un terrain déplorablement propice. C'est chaque année que se renouvelle plusieurs fois la lamentable histoire de personnes descendues au cellier et qu'on retrouve quelques heures après étendues inanimées, serrant dans leur main crispée la lampe meurtrière. C'est encore l'histoire du maçon qui crépit un mur et veut à un moment donné, pour mieux s'éclairer, déplacer une baladeuse et l'attacher au larmier. Il la saisit des deux mains, pousse un cri et s'écroule comme une masse.

Le sol du jardin, après la pluie, devient de même tout aussi dangereux si l'on y manipule une lampe portative ou si par exemple on a la mauvaise idée de changer une ampoule en montant avec des chaussures humides sur une chaise dite de jardin, c'est-à-dire métallique.

D'autres lieux où le sol est d'habitude humide, arrosé ou parsemé de flaques d'eau, les buanderies, les garages, ont également à leur compte un bon nombre d'accidents.

Il serait désirable qu'à titre d'enseignement, soient largement diffusées les circonstances dans lesquelles un garagiste de Cherbourg trouva la mort. Le propriétaire d'une voiture lui ayant demandé de rechercher pourquoi son moteur était subitement devenu récalcitrant, ce garagiste, chaussé d'espadrilles, alla quérir une baladeuse qu'il déposa sur le châssis, puis se mit en devoir de tourner la manivelle, qu'il saisit par son manche gainé de bois. Pour déployer plus de force, il effectua le mouvement familier aux chauffeurs de s'agripper par la main gauche au ressort de suspension et fut aussitôt électrocuté. La

tension avait, de la baladeuse mal isolée, passé à la masse, et avait été dérivée à la terre par la main gauche de la victime.

Pour des raisons analogues, on se gardera de chercher d'éteindre avec de l'eau un commencement d'incendie d'origine électrique.

Témoin le cas rapporté par Balthazard. A l'occasion du court-circuit d'un courant alternatif de 110 V ayant entraîné un incendie, le patron d'un hôtel jette de l'eau sur le mur; le plancher se trouve copieusement mouillé. Les fils sont coupés avec une hache à manche de bois. Mais pour donner des explications à l'électricien, le patron, les mains mouillées, porteur de savates imbibées d'eau, saisit un fil de la main gauche. Il tombe, perd connaissance et meurt presque aussitôt.

Non moins dangereux que le sol visiblement humide, sont les revêtements en béton, substance éminemment hygrométrique et capable d'acquérir par temps humide une conductibilité très élevée. Le ciment mouillé, dit JELLINEK, est aussi conducteur que le fer. On ne saurait assez insister par suite sur les inconvénients que présentent au point de vue de la sécurité de leurs habitants les constructions en ciment armé.

La richesse en ions des liquides imprégnant le sol élève encore la conductibilité de contact avec celui-ci et explique la gravité des accidents qui surviennent dans les tanneries, les brasseries, les usines de produits chimiques par la simple manipulation d'une lampe électrique, d'une baladeuse, ou le contact fortuit d'un conducteur sous tension.

Dans les locaux domestiques, les canalisations d'amenée ou de départ de l'eau, mettent une « terre » excellente en quelque sorte à portée de la main. Il en est ainsi de la cuisine, de l'office, de la salle d'opérations, du cabinet de toilette. LANGLOIS a rapporté, il y a bien longtemps, l'histoire de cette cuisinière qui voulant s'éclairer sur la pierre à évier attira au-dessus de celle-ci une lampe à suspension, et fut électrocutée au moment où de son autre main elle saisissait le robinet. Depuis, cet accident s'est renouvelé un grand nombre de fois.

Dans le cabinet de toilette dallé et humide d'un palace, une dame, les pieds chaussés de sandales, constate que l'appareil destiné à chauffer son fer à friser refuse de fonctionner. Entendant en le secouant un bruit insolite, elle y enfonce la main, et reçoit une secousse terrible qui fut assez violente pour provoquer simultanément une luxation de l'épaule et une fracture des os de l'avant-bras.

La morale de ce fait-divers est que tous les appareils modernes de

chauffage électrique, bouilloires, fers à friser, fers à repasser, séchoirs, dont l'isolement par l'usage et sous l'action de la chaleur finit toujours par devenir déficient, devraient être étroitement surveillés et contrôlés et ne jamais être utilisés qu'en lieu sec, car, avec une bonne terre, au lieu d'une simple secousse, ce serait l'électrocution qu'on aurait à déplorer.

Je rapporterai encore, à cause de ses circonstances inattendues et à la vérité imprévisibles, le cas, cité par JELLINEK, d'un patient assis sur le fauteuil du dentiste et ayant sa bouche au sol par l'intermédiaire d'une trompe aspiratrice de salive qui gagnait la vidange du crachoir. Le fil de la lampe frontale du praticien s'étant subitement détaché et étant tombé sur la main du patient, celui-ci reçut une violente secousse et perdit connaissance.

De tous les locaux humides le plus « insalubre » est la salle de bains.

Depuis le temps où, à Fulham, en Angleterre, fut signalé le premier cas d'accident de baignoire connu, — il s'agissait de deux baigneurs qui, pour voir ce qui se passait dans la cabine voisine, tentèrent, les pieds dans l'eau, de se hisser en empoignant un tube contenant la canalisation d'éclairage imparfaitement isolée et furent électrocutés — depuis ce temps, les accidents de ce genre se rééditent avec une lamentable périodicité. J'ai plusieurs fois à la tribune de l'Académie de Médecine, avec l'espoir d'être entendu du grand public, et exemples à l'appui, insisté sur les dangers de la salle de bains, et d'une façon plus générale sur tous ceux résultant de la proximité de l'eau et de l'électricité. Il me faut à regret constater que sur ce point l'éducation du public est loin d'être faite car tout récemment j'ai eu connaissance de deux nouveaux accidents de baignoire et il est bien certain que tous ne me reviennent pas. Le mécanisme en est toujours le même. C'est tantôt la chaîne métallique de la sonnette forfuitement en communication avec une canalisation d'éclairage, plus souvent le contact pendant le bain avec un de ces nombreux petits appareils électriques de séchage, radiateurs paraboliques, pistolets à air chaud, dont l'isolement s'altère toujours par l'humidité.

Aux Etats-Unis, pareil accident s'est produit il n'y a pas bien longtemps avec un de ces appareils ultra-violets portatifs qu'un jeune homme, victime de son imprudence, utilisait pour faire disparaître des comédons qu'il avait dans le cou. On le trouva, l'appareil à la main, inanimé dans son bain, et cela faute sans doute d'avoir pris connaissance de la notice livrée avec l'appareil et qui recommandait de

ne l'utiliser que dans la chambre à coucher et non dans la salle de bains « la vapeur d'eau pouvant arrêter les ultra-violets ».

Malgré l'absence de prise de courant dans la salle de bains, l'électrocution reste possible. Dans l'un des derniers cas auxquels il est fait allusion ci-dessus, la victime avait branché le fil souple du séchoir électrique, à l'aide d'un bouchon-baïonnette, sur la douille d'une lampe à incandescence éloignée.

Mais plus étranges et mystérieuses furent les circonstances dans lesquelles une jeune bonne trouva la mort dans son bain, alors qu'aucun conducteur électrique ne pénétrait dans la pièce. L'enquête, ainsi que nous le rapporte JELLINEK, finit par démontrer après maintes difficultés que la jeune fille avait été électrocutée en voulant tirer de l'eau, le robinet métallique se trouvant sous tension par un contact accidentel, à la cave, de fils électriques mal isolés avec la colonne montante de la distribution d'eau. La victime avait donc shunté l'écoulement au sol de la tension nocive (qui aurait dû suivre la canalisation d'amenée de l'eau) par le conducteur de moindre résistance que réalisait l'énorme surface de contact de son corps immergé.

LES MESURES PROPHYLACTIQUES.

Dans les centrales et les établissements industriels de grande classe tout est prévu pour la protection des travailleurs. Un grand nombre de mesures ont du reste été officiellement homologuées. Les pouvoirs publics en France ont, en effet, édicté que, dans les usines de distribution électrique, les dispositions à prendre devaient répondre à l'arrêté du 30 avril 1927 du Ministre des Travaux publics pris en conformité de l'article 19 de la loi du 15 juin 1906, et les installations électriques dans les établissements industriels, aux prescriptions du décret du 1er octobre 1913 du Ministre du Travail, pris en exécution des lois du 26 novembre et 31 décembre 1912 sur la protection des travailleurs des dits établissements.

L'ordonnancement de l'installation dans les locaux des centrales et des établissements industriels doit être tel que le personnel ne puisse entrer en contact avec la haute tension : larges passages, grillages de protection dans les endroits particulièrement dangereux, pièces de commande pourvues, pour en rehausser la sécurité, d'un double isolement, signalisation lumineuse des appareils et conducteurs sous tension.

Mêmes principes pour les cabines de transformation. Celles-ci doi-

vent être érigées en lieu sec, être convenablement ventilées et éclairées, à l'abri des poussières et suffisamment spacieuses pour que l'employé soit mis dans l'impossibilité d'entrer en contact involontaire avec l'appareillage. L'emplacement des sectionneurs doit y être bien visible, la perche et le tabouret bien en place, si l'automatique n'y a pas déjà fait son apparition. Une précaution qui n'est pas superflue est de pourvoir chaque cabine d'une lanterne, de bougies et d'allumettes.

Au dehors, les câbles haute tension seront conduits loin des habitations, loin des lieux de réunion, écoles, jardins, etc. On sait d'autre part le danger qu'ils présentent pour la navigation aérienne. On n'a certainement pas oublié l'accident du pilote de Lamothe, en 1927, dont l'appareil prit feu au contact d'un câble de haute tension qu'il n'avait pas aperçu, et qui périt carbonisé. En vue d'éviter ce danger au cours des vols de nuit, on procède actuellement, le long des grandes routes aériennes, au balisage des lignes de haute tension au moyen de tubes au néon.

Pour toutes les vérifications ou réparations, l'ouvrier aura à sa disposition des outils, des gants, des sandales, bien isolants et en bon état.

A l'usine ou dans les cabines de transformateurs, en raison des effets de capacité et des défauts d'isolement, d'une connexion fortuite avec la tension, la mise à la terre des masses métalliques, fermes, supports d'isolateurs, grillages, bâtis de machines qui se trouvent dans le voisinage des conducteurs s'impose. Il en sera de même dans les ateliers où fonctionnent des machines-outils à basse tension.

Comme il faut compter avec la résistance du fil de terre, il y a lieu de prévoir un conducteur assez peu résistant pour qu'entre le point le plus éloigné du sol et la terre franche, la différence de potentiel ne dépasse pas une vingtaine de volts.

On accroîtra néanmoins encore la sécurité pendant le travail en se servant du tapis isolant.

Enfin on aura à veiller à la bonne conductibilité des prises de terre, à les enfouir assez profondément jusqu'à la rencontre d'une couche bien humide et l'on procédera fréquemment au contrôle de leur résistance.

La séparation rigoureuse des prises de terre aux deux étages respectifs des transformateurs, leur écartement suffisant pour qu'une cause fortuite ne puisse faire leur liaison, figure également parmi les précautions d'installation les plus élémentaires. Le but en est la prévention du passage de la haute sur la basse tension que favoriserait,

en cas de surtension, la conductibilité insuffisante, voir même la rupture d'une terre commune.

Que la surtension provienne d'un contact entre des conducteurs haute et basse tension cheminant parallèlement sur les mêmes supports, d'une rupture de conducteur ou de disjoncteur, ou encore de l'électricité atmosphérique, il importe, indépendamment des parafoudres ou des selfs shuntées dont la déficience est toujours possible, d'assurer le libre écoulement de la décharge par la répartition correcte et la qualité des prises de terre. Encore parfois l'ensemble de ces moyens de protection n'interdit-il pas toujours à la tension anormale de franchir le transformateur et de se propager chez l'abonné le long du chemin de moindre résistance que lui offre la distribution basse tension. Elle se signale alors par des effluves, des aigrettes lumineuses, des étincelles qui surgissent dans un ou plusieurs points de la canalisation et si l'abonné se trouve à proximité d'un appareil électrique ou se précipite sur son interrupteur, il risque de recevoir la décharge. On cite souvent à cet égard le fameux accident d'Olgirate, en Italie, où la surtension fit de la sorte plus de 25 victimes.

Il y a à peine six mois, le 30 juin 1931, dans un village des Pyrénées Orientales, des circonstances analogues jointes à une déplorable imprudence coûtèrent la vie à un habitant et occasionnèrent de sérieuses brûlures à deux autres. Au cours de surtensions atmosphériques, en raison du mauvais état des fils de terre, dont l'un fut trouvé fondu, se produisit un mélange entre la haute et la basse tension qui fit apparaître dans la canalisation d'alimentation d'une lampe, chez un abonné, un grésillement insolite et des étincelles. Celles ci mordant sur une traverse en bois et menaçant d'allumer un incendie, l'abonné, un épicier, monta sur un grand bidon métallique et s'accrochant avec la main gauche à un grillage, se mit à tamponner la traverse avec un linge mouillé. Il s'affaissa aussitôt. Son père, en se portant à son secours, reçut à son tour la décharge, mais ne fut que brûlé. En dépit d'une tentative de respiration artificielle, l'épicier ne put être ranimé.

L'an dernier, dans un bourg du Morvan, région fréquemment visitée par les orages, semblable accident s'est produit : un enfant de treize mois fut mortellement frappé sans que personne du reste n'ait songé à pratiquer la respiration artificielle ; d'autres habitants furent plus ou moins grièvement brûlés. De l'enquête faite par l'ingénieur du Contrôle, il résulta qu'on

ne put relever aucun vice d'installation à la charge du réseau exploitant. Ce genre d'accidents peut donc dans certaines conditions, échapper aux moyens de protection usuels et constitue des catastrophes inévitables, mais heureusement assez rares.

La question de la mise à la terre du neutre, notamment en basse tension triphasée, a été résolue par l'arrêté ministériel du 30 avril 1927, qui a rendu obligatoire cette mise à la terre pour la subdivision B1 de la première catégorie (tension eff. $\leqslant$ 150 V entre conducteurs et terre), laissant en revanche toute liberté aux exploitants pour la subdivision B2 et les autres catégories. Mais il faut savoir que les membres du Comité d'Electricité au ministère des Travaux publics, chargés de préluder à la décision ministérielle ont manifesté de sérieuses divergences d'opinion qui témoignent de la difficulté du problème. Loin de moi, bien entendu la prétention de vouloir, après des personnalités aussi qualifiées de l'électrotechnique, intervenir dans la controverse et je me contenterai simplement d'effleurer la question.

La mise à la terre du neutre se réclame d'un certain nombre d'avantages techniques, constance de la tension entre chaque phase et la terre, équilibrage des phases, plus grande facilité dans la découverte des défauts d'isolement des conducteurs, fonctionnement plus sûr des appareils de protection en cas de passage de la haute tension sur la basse.

Les défenseurs de l'isolement du neutre répondent que cette protection est assurée par les limiteurs de tension qui mettent le neutre au sol en cas de surtension ; néanmoins, il faut toujours prévoir l'éventualité d'un fonctionnement défectueux de ces appareils et le danger qui en résulte de ce chef.

En ce qui concerne la sécurité des personnes, si l'on s'en rapporte au calcul, celui-ci, basé sur l'intensité déjà dangereuse de 0,050 A. et les valeurs ohmiques des résistances de contact avec l'organisme dans des circonstances variées, montre que pour la tension la plus courante de la subdivision B1 (115 - 220 V), tant que la résistance dépasse 4 000 ohms, ce qui est le cas des contacts secs, sol sec, chaussures sèches, le courant dérivé au sol ne peut atteindre une intensité dangereuse, mais que par contre le danger surgit dès que la résistance se trouve abaissée aux environs de 2 000 ohms, ce qui est le cas des contacts humides, de la cuisine, de la salle de bains et surtout des installations *rurales* où, pour ainsi dire par définition, les *bonnes terres* constituent une éventualité permanente.

C'est pourquoi l'isolement du neutre est apparu comme la mesure

rationnelle, capable de réduire ces risques, malgré qu'en cas d'accident le sujet puisse se trouver soumis à la tension composée $E\sqrt{3}$.

Théoriquement, si l'isolement était rigoureusement parfait, le sujet venant au contact de la phase serait simplement soumis à la charge statique de celle-ci, ce qui serait sans doute sans inconvénient. Mais toute la question est de savoir si la perfection de l'isolement du neutre n'est pas une conception trop théorique, si elle n'est pas surestimée et si, par suite, l'adoption de cette mesure fournirait réellement la sécurité prévue. Il semble, en effet, assez difficile d'admettre que, sur une distribution quelque peu étendue, malgré tout le soin et la surveillance apportés à l'isolement, il ne se produise pas des fuites assez importantes et qu'on ne puisse se trouver à la merci d'un défaut méconnu.

L'une des causes les plus communes d'accidents chez l'usager réside dans le *mauvais entretien* des lignes et des appareils. Il suffit de pénétrer dans certains ateliers plus ou moins exigus, plus ou moins humides, pour y constater le mépris où l'on tient la basse tension et y apercevoir, voisinant avec toutes sortes d'outils un enchevêtrement désordonné de fils plus ou moins dénudés.

Il est essentiel que tous les appareils-outils portatifs, perceuses, fraiseuses, chignoles, susceptibles d'être maniés sur un sol humide ou auprès de grandes masses métalliques, ne le soient que garnis d'une gaine isolante protectrice. Un fil de terre à la masse dont on vérifiera fréquemment l'intégrité protégera de même l'usager.

Chez le particulier, l'installation est correcte au jour de la réception, mais tout le monde se croit électricien. Tout le monde sait faire des épissures, poser un interrupteur et ce travail d'amateur se fait d'ordinaire sans aucun souci de placer ce dernier plutôt sur le neutre que sur la phase, si bien qu'un jour on est tout surpris, l'interrupteur étant à l'arrêt, de recevoir un choc, quand, par bonne fortune, il n'en résulte pas un accident plus grave.

Il serait désirable que, dans l'intérêt même des usagers et dans leur intérêt propre (eu égard au discrédit que peuvent jeter sur leur exploitation les accidents mortels) les Compagnies de distribution profitent plus souvent du droit qu'elles se réservent dans leurs polices de vérifier le bon entretien des installations intérieures. Cette surveillance empêcherait sans doute les additions plus ou moins singulières qu'apportent parfois les abonnés à leur installation et, s'exerçant plus sévèrement dans les pièces humides de l'habitation, elle aurait peut-être l'heureux résultat d'obtenir la réparation d'appa-

reils en mauvais état, de faire déplacer des lampes trop accessibles et d'expurger la salle de bains de chaînettes métalliques et d'indésirables prises de courant.

Pour envoyer à la réforme les dangereux types de baladeuses condamnés par l'Union des Syndicats de l'Electricité, celles dont le treillis, solidaire de la douille, en extériorise la tension quand le montage en est mal fait, il serait souhaitable que les compagnies d'assurances refusent de couvrir les sinistres survenus avec des appareils de ce genre. On ne verrait peut-être plus alors à l'atelier, au garage, à la chaudronnerie, dans les chantiers navals que des baladeuses dont la douille, dissimulée dans le manche isolant ne saurait entrer en contact avec le panier.

Une autre solution pour éviter les accidents de baladeuses consiste à abaisser préalablement la tension à 24 V par exemple, tension incapable de provoquer des accidents. La dépense d'un transformateur se trouverait du reste en partie couverte par une moindre consommation, une lampe de 15 W - 24 V à gros filament ayant même pouvoir lumineux qu'une lampe 25 W - 220 V.

En ce qui concerne les ouvriers, manœuvres, employés, contremaîtres d'usines ou de centrales, agents des réseaux électrifiés travaillant auprès des génératrices ou sur les lignes, *l'instruction professionnelle* reçue à l'école d'apprentissage, les règlements officiels, ordres de service, etc. affichés, devraient suffire pour tenir leur défiance constamment en éveil. Mais il n'y a rien à perdre à la raviver par des appels répétés à l'intelligence et à la sagacité, au bon sens et à la présence d'esprit, par la multiplication d'avertissements placés bien en vue aux endroits les plus dangereux, par des affiches-images représentant les mortelles conséquences d'une faute de manœuvre, par la distribution fréquente de petits bréviaires, rappelant sous forme de recommandations ou d'aphorismes la série des précautions dont un électricien ne doit jamais se départir, comme par exemple :

Prendre le parti de toujours considérer tout conducteur comme sous tension.

Tout contact peut être mortel même s'il s'agit de basse tension.

Ne branchez pas un fil de terre en l'attachant d'abord à la tension.

Il est interdit d'entrer dans un poste de transformation envahi par l'eau.

Dans une cabine de transformateur, marcher à petits pas.

Les deux mains de l'opérateur doivent toujours être gantées pour la coupure du courant haute tension.

En aucun cas l'âme ne doit se trouver relier seule. Couper d'abord le câble intérieur, puis le concentrique.

Pour travailler au voisinage d'un transformateur, coupez non seulement la haute mais aussi la basse tension.

Il faut en effet avoir toujours présent à l'esprit que le transformateur peut fonctionner en parallèle avec d'autres et que dès lors le sectionnement du primaire n'exclut pas un retour possible de la basse tension.

L'instruction professionnelle, au point de vue des accidents de l'électricité, délaisse malheureusement certaines catégories d'ouvriers, peintres, maçons, serruriers, couvreurs, que leur travail peut appeler au voisinage des lignes de haute tension.

Signalons de même ce fait regrettable qu'aucune théorie spéciale n'est faite aux gendarmes, gardes champêtres, agents-voyers que leur présence sur la voie publique peut rendre témoins d'accidents et mettre dans l'obligation d'intervenir.

Les commissions pour la protection contre les accidents de l'électricité ont maintes fois émis l'avis que l'éducation du grand public devait être faite dès l'école, par des conférences sur l'électricité, des leçons de choses, des projections, et, conformément à ce vœu, le Ministre de l'Instruction publique a maintes fois et périodiquement enjoint aux instituteurs d'avoir à consacrer quelques leçons à cet enseignement. Le Ministre leur a même demandé de s'entendre avec les conducteurs des Ponts et Chaussées pour organiser une ou deux fois par an des conférences publiques dans les localités rurales.

En principe cette méthode de vulgarisation apparaît excellente, mais son exécution rencontre une assez large indifférence. Le chiffre de 18 électrocutions que l'on trouve dans la statistique de 1918, concernant des enfants ayant trouvé la mort au sommet des pylônes, paraît bien attester l'insuffisance de la propagande dans les campagnes. Dans le cas particulier le mieux est encore de tenter d'empêcher les oiseaux de bâtir leurs nids dans les pylônes, comme le font certaines sociétés de distribution en aveuglant par des planches tous les jours au voisinage du sommet.

L'éducation du grand public est à faire d'une façon plus intensive. Il faut détruire chez lui le préjugé de l'innocuité de la basse tension, lui faire savoir qu'il y a plus d'accidents de basse tension que de haute tension ; il faut que le concierge, le caviste, le valet de ferme, le jardinier ou plus exactement tout le monde sache, j'ajouterai même les gens les plus cultivés, qu'il est imprudent de pénétrer, les pieds nus

ou humides, dans la cave, l'étable, le jardin, avec une lampe à la main.

Il faut que l'abonné soit instruit des circonstances nullement exceptionnelles où l'énergie qui l'éclaire et le chauffe peut devenir cause de catastrophe; la manipulation de tout appareil électrique devra évoquer immédiatement en son esprit l'image de la dangereuse promiscuité de l'eau.

Le remède à son ignorance n'est pas ailleurs que dans une large diffusion de chaque nouvel accident, et dans l'apposition d'avertissements dans les endroits les plus dangereux comme on le fait obligatoirement pour la haute tension. Les pouvoirs publics devraient aider les producteurs à imposer cette dernière condition. On m'a opposé que le constructeur d'automobiles n'avait pas à connaître de l'impéritie de son client. Il m'a semblé que la comparaison n'était guère fondée, parce que le danger cinématique est un danger accessible à nos sens, prévisible, et nullement spécial à la voiture, tandis que le danger électrique n'a pas d'homologue et qu'il se dissimule perfidement derrière l'apparente innocence du conducteur métallique ou liquide.

Pourquoi, du reste, certaines compagnies productrices d'énergie électrique qui distribuent à leurs abonnés de haute tension de petits fascicules, contenant les mesures préventives à prendre dans leurs installations et dans leur fonctionnement n'ont-elles pas la même attention pour les usagers de la basse ? La sécurité de ceux-ci aurait-elle moins de prix ?

Le souci de ne répandre dans le public que des appareils de bonne qualité et de construction correcte a amené très heureusement l'U.S.E. à les faire soumettre, quoique facultativement, à l'appréciation d'un jury impartial et qualifié (marque de qualité AP-EL). Toutefois, malgré cette précieuse garantie, on ne peut éviter, si l'on n'en est prévenu, que la détérioration fortuite ou par l'usage de ces appareils, ne se présente à un moment donné comme cause éventuelle d'accident.

Je signalerai enfin l'heureux concours que prêtent à la propagande de prévention des accidents électriques certaines sociétés comme l'Association des Industriels de France, dont le but est d'éclairer de ses avis les chefs d'entreprises, et de leur fournir les moyens (articles, revues, images) d'intensifier la protection du travailleur.

L'introduction de courants de haute tension dans les locaux d'habitation pour les besoins de la *radiologie médicale* constitue une hérésie, mais inévitable.

Il faut convenir cependant que si certains services de radiologie, sont devenus avec leurs générateurs à 200, 300 ou 400 000 V de véritables usines de haute tension, les constructeurs n'ont pas négligé d'y introduire simultanément tous les moyens de protection nécessaires pour le malade, le médecin et ses aides. Avec les installations modernes, établies dans de vastes locaux avec des câbles bien protégés et sur un plancher bien isolant, le personnel ne court véritablement qu'un risque insignifiant, mais il n'en est pas de même pour les installations vétustes agencées dans des locaux exigus et non construits spécialement pour cet usage, où les distances ne sont pas respectées et où règne parmi les conducteurs un vagabondage désordonné.

Dans la manipulation de ses appareils, le radiologiste court un double danger, celui de la mise à la terre, et celui du double contact. L'un et l'autre ont donné lieu jusqu'ici à de nombreux accidents dont quelques-uns mortels.

La mise à la terre a presque toujours lieu après détachement d'un fil qui malencontreusement vient frapper la masse métallique d'un support. Et non seulement le radiologiste se trouve ainsi à la merci de sa terre, mais court encore le risque s'il a le pied sur la pédale interruptrice de basse tension de connecter avec celle-ci la haute tension secondaire.

La protection du radiologiste est tout entière dans la bonne mise à la terre de ses appareils et plus encore peut-être dans la nature du sol de son laboratoire. Les conditions de mise à la terre des appareils ne différeront pas de celles en usages dans les usines de haute tension. On aura à prévoir de larges bandes de cuivre en parfait contact avec l'instrumentation, se continuant avec un fil de section suffisante pour aboutir à une plaque de terre spéciale. Le sol ne sera, ni carrelé, ni bétonné : le plancher en bois sans clous, sans interstices, recouvert lui-même d'un tapis épais, offre déjà un isolement convenable, mais la meilleure garantie sera assurée par une couche sous-jacente de bitume. De toute façon les radiateurs, s'ils s'avancent trop dans le champ de travail, devront être protégés par des caisses en bois.

Il convient de signaler que des dispositifs spéciaux ont été imaginés et construits pour couper le primaire dès que s'établit une fuite à la terre, notamment à travers l'organisme d'un sujet. Ces dispositifs comportent un relais fixé sur une dérivation au sol du point milieu du transformateur. Il suffit que ce circuit soit parcouru par quelques milliampères pour déclancher la rupture du primaire.

Ces moyens de protection n'assurent pas cependant contre le danger

du double contact. Celui-ci se produit généralement lorsque le manipulateur, distrait ou à la suite de la manœuvre imprévue d'un assistant, saisit simultanément les deux pôles.

La signalisation lumineuse par de petites lampes colorées, doit pouvoir radicalement mettre fin à ce genre d'accidents.

Les théories du mécanisme de la mort et le traitement des électrocutés

Le problème du sauvetage des électrocutés réclame au préalable la connaissance des fonctions altérées ou des lésions produites par l'irruption du courant électrique.

Pendant de nombreuses années deux théories ont été en présence : la *théorie bulbaire* et la *théorie cardiaque*. D'Arsonval, en 1887, avait émis l'hypothèse d'une inhibition des centres bulbaires dont le principal effet était l'arrêt respiratoire et l'asphyxie, celle-ci toutefois non irréductible. D'où la formule, devenue un véritable axiome thérapeutique, qu'un électrocuté doit être traité comme un noyé, c'est-à-dire par la respiration artificielle.

Les recherches de Tatum, sur l'animal, ayant mis en évidence une action paralysante du courant sur le cœur, et la découverte des trémulations fibrillaires des ventricules par Oliver et Bolam ayant ouvert des horizons nouveaux, Prévost et Batelli, de Genève, dans des expériences célèbres, montrèrent que chez le chien, dans certaines conditions et notamment aux basses tensions, la mort avait pour cause cette modification irrémédiable du rythme cardiaque.

Transférées dans le domaine de la pathologie humaine. ces expériences constituèrent le fondement de la théorie cardiaque qui attribua chez l'homme la plupart des cas mortels à la fibrillation ventriculaire et à son caractère définitif. Particulièrement séduisante, cette théorie traversa une ère de fortune, tandis que, fidèle aux idées de d'Arsonval, Jellinek s'ingéniait à répandre la conviction que la mort par l'électricité se révélait le plus souvent comme une mort par asphyxie, revêtant communément le masque de la mort apparente.

L'opinion accepta la dualité du mécanisme de la mort. Elle prit appui sur le fait énoncé par les physiologistes de Genève que l'aberration définitive du rythme cardiaque était l'apanage des basses tensions, tandis qu'en haute tension la mort paraissait relever de l'inhibition respiratoire, et sur l'apparente confirmation apportée par la statistique et les électrocutions pénales à ces résultats expérimentaux,

à savoir que la basse tension se révélait couramment comme plus dangereuse, plus meurtrière que la haute.

Dans la suite, l'attention fut appelée sur l'asphyxie par tétanisation des muscles respiratoires que l'expérience, avec des intensités relativement assez faibles, avait fait reconnaître chez le chien (Weiss) et suspecter chez l'homme à la suite de certaines autopsies (Balthazard). Aussi cette dernière théorie est-elle venue s'annexer aux deux précédentes.

Les succès de la respiration artificielle, notamment chez des victimes de la basse tension, commencèrent cependant bientôt à inspirer à l'Ecole Viennoise quelques suspicions sur la légitimité de la théorie cardiaque, voire même un moment sur l'existence des trémulations fibrillaires elles-mêmes que, faute d'autopsie immédiate, personne n'avait jamais pu constater chez l'homme. Toutefois cette lacune s'est trouvée comblée il y a quelques années par leur découverte en Amérique chez deux condamnés à mort, rapidement autopsiés et par la curieuse observation du chirurgien allemand Kronecker qui très facilement les fit apparaître sur le cœur en ectopie extra-thoracique d'un nouveau-né, de ce fait non viable. Aucune preuve certaine par contre n'a pu être fournie que la fibrillation serait définitive chez l'homme comme chez le chien, le chat, le cheval. Dans plusieurs espèces animales en effet, chez le lapin, le cobaye et particulièrement chez certains anthropoïdes, elles sont simplement temporaires. Il faut reconnaître que les arguments de Jellinek ont fait perdre beaucoup de terrain à la théorie cardiaque, et celle-ci n'est plus guère défendue aujourd'hui que par Naville et de Morsier, élèves de Batelli.

Les conceptions pathogéniques de la mort par l'électricité se trouvent, en effet, actuellement plus nettement orientées vers l'asphyxie, asphyxie centrale, par choc, sidération bulbaire en haute tension, asphyxie d'origine probablement beaucoup plus complexe en basse tension. Simonin, de Strasbourg, voudrait la rattacher exclusivement à la tétanisation des muscles respiratoires, mais ce mécanisme ne paraît pas être aussi commun que semble le prétendre cet auteur. Il semble bien plutôt que l'asphyxie soit le résultat d'une action directe ou indirecte du courant sur l'appareil nerveux vaso-moteur. Comme l'admettent Cot et Jacob, il s'agirait d'un spasme artériel constricteur initial qui déterminerait à sa suite l'engorgement et l'hypertension dans les réseaux veineux et capillaires du poumon. Cette conception se confirme dans les manifestations d'œdème aigu du poumon (expuition de spume sanguinolente), que l'on retrouve cliniquement au mo-

ment ou peu après l'accident, ainsi que dans les lésions caractéristiques que SCHRIDDE dans 21 cas sur 39 a pu trouver à l'autopsie.

Il y a quelque trente ans, comme je cherchais à répéter sur le chien les expériences de Leduc, dites « sommeil électrique », et qui consistaient à appliquer entre vertex et dos un courant continu de très basse tension, interrompu dix à douze fois par seconde, je fus amené à constater dans les effets du courant, d'une part, une très grande similitude avec les symptômes cliniques du coma épileptique et, d'autre part, des accidents s'apparentant très étroitement avec les manifestations cliniques de l'électrocution.

Tandis que le chien supportait admirablement l'accroissement et la diminution bien progressive de l'intensité, une rupture brusque entraînait la mort immédiate de l'animal avec spume sanguinolente, voire même hémorragie pulmonaire abondante. L'animal mourait ainsi comme un électrocuté, avec des signes d'œdème pulmonaire et des hémorragies démontrant que la surexcitation avait vaincu la tolérance des parois vasculaires pour la pression régnante.

Il semble donc bien aujourd'hui que l'asphyxie soit le mécanisme commun de la mort par les courants électriques, asphyxie le plus souvent par hypercongestion directe des vaisseaux pulmonaires, mais parfois aussi par tétanisation et, en haute tension notamment, par inhibition centrale. Quant aux trémulations fibrillaires, elles seraient peut-être seulement un phénomène secondaire, pouvant compliquer de ses conséquences circulatoires, le phénomène principal, l'asphyxie.

Au point de vue *thérapeutique*, il est évident que dans tout accident électrique, la première préoccupation doit être de faire couper le courant et, si la victime se trouve suspendue à un câble, de préparer un lit de foin, de paille, des matelas, etc., pour éviter les conséquences de sa chute sur le sol.

On ne saurait assez instruire le public du danger que l'on court en cherchant à délivrer la victime d'un accident, tant qu'elle se trouve encore en contact avec la tension, parce qu'on risque d'être électrocuté soi-même.

Dans un récent accident survenu dans une installation radiographique, et où un de nos collègues trouva la mort, ceux qui assistèrent à son électrocution, instinctivement se précipitèrent sur lui pour essayer de le relever. Une commotion désagréable les obligea à renoncer à leur tentative.

Cette imprudence peut avoir des suites plus graves, comme le mon-

tre ce triste fait divers. Un câble nu, parcouru par de la basse tension, emprunte quelque part la tranchée du chemin de fer. Un enfant qui avait franchi les haies de clôture de la voie et jouait au voisinage, est pris entre la tension et le sol et tombe électrocuté. Un de ses petits camarades qui s'amusait avec lui, ayant compris ce qui lui arrivait, veut lui porter secours ; il tombe à son tour. Il en fut de même d'un passant qui tenta d'arracher les enfants au danger.

Il importe donc de ne chercher à venir en aide à un électrocuté resté au contact de la tension qu'en prenant pour soi-même toutes précautions d'isolement nécessaires : si possible, on cherchera à dégager la victime avec une perche en bois sec ou une corde également bien sèche, etc.

Appelés par leur fonction à traiter ou à expertiser des cas d'électrocution, le médecin d'usine, de compagnie d'assurances, le médecin légiste n'ignorent évidemment rien de la pathologie des accidents électriques, mais, parmi les médecins-praticiens, il en est auxquels cette question est beaucoup moins familière.

Pourtant tout médecin quel qu'il soit, se doit de n'en rien ignorer même s'il s'est spécialisé dans une branche étrangère, même s'il n'a pas dépouillé le traditionnel mépris que lui ont inspiré au début de ses études médicales les choses de l'électricité, les volts et les ampères. Il ne s'agit pas là d'une question d'instruction professionnelle, mais d'une question de pure culture générale que rend obligatoire le rang social du médecin.

Lorsque tous seront dûment avertis, on ne verra plus porter inconsidérément le diagnostic de cardiopathie méconnue, d'embolie pulmonaire ou d'apoplexie, dans certains cas de mort subite au cours d'un bain par exemple ; on ne verra plus la famille d'un ouvrier, tombé foudroyé dans son atelier et pris par erreur pour un cardiaque, injustement privée d'une légitime réparation pécuniaire.

On ne verra plus un jeune interne de garde, auquel est amené, inanimée, une victime de l'électricité, négliger de la considérer comme en état de mort apparente et laisser l'œuvre de mort s'achever sans tenter la respiration artificielle. On ne verra plus non plus le médecin appelé d'urgence dans une usine s'en faire remontrer par des ouvriers plus compétents que lui dans la pratique de ce moyen de sauvetage.

Axiome incontesté, la formule de d'ARSONVAL : « un électrocuté doit être traité comme un noyé » régit la thérapeutique de l'électrocution. Sans perdre un temps précieux à l'examen du cœur, des réflexes, des

pupilles, autorisé tout au plus à rechercher si le pouls est resté perceptible, le médecin doit procéder, *au plus vite*, aux manœuvres de la *respiration artificielle*.

Aux tractions rythmées de la langue aujourd'hui abandonnées, à la méthode de SYLVESTER si longtemps classique et qui exige des aides susceptibles de se relayer, s'est substituée, en raison de la simplicité de sa technique, la méthode SCHÆFFER.

On sait que dans cette méthode, la victime étant couchée sur le ventre et le sauveteur à cheval sur ses cuisses, ce dernier, utilisant le poids de son corps, comprime avec la face palmaire de ses mains les parois latérales du thorax dans un mouvement rythmique, à la cadence de la respiration, et cela jusqu'à ce que cède la paralysie respiratoire, jusqu'à ce que les centres retrouvent leur fonctionnement.

Cette manière de faire est peu fatigante pour le sauveteur et lui permet de prolonger très longtemps son action. La méthode dispense, du reste, de tirer la langue, et elle s'oppose par la position du sujet à ce que les mucosités viennent encombrer le pharynx. Il est recommandé pendant toute la manœuvre de se garder d'efforts intempestifs, une trop grande violence pouvant, comme cela s'est produit, aboutir à une rupture du poumon et même de l'estomac.

Il y a quelques années, PANIS, a imaginé un dispositif automatique, produisant la compression et la décompression thoraciques selon le procédé de SCHÆFER, par la simple manœuvre d'un levier. L'effort à faire sur ce levier est si faible qu'un ouvrier, un infirmier, un sauveteur quelconque peut manœuvrer l'appareil d'une seule main et cela pendant des heures entières, sans la moindre fatigue.

D'autres appareils, l'appareil de Chéron, l'appareil de Cot, reposent sur le même principe, mais se signalent par d'importants perfectionnements. Un grand nombre de ces appareils sont en service dans beaucoup d'hôpitaux, de postes de secours et ils devraient être rendus obligatoires dans toutes les usines où peuvent se présenter des cas d'asphyxie.

Des démonstrations devraient également en être faites au personnel de manière à pouvoir créer ainsi dans les usines des équipes de sauveteurs.

La durée pendant laquelle il convient de poursuivre la respiration artificielle ne se prête pas à une prescription réglementaire. Mais ce n'est pas par trois, cinq ou dix minutes que se comptent ici les temps. On a dit qu'il fallait la poursuivre tant que la victime ne donnait pas des signes de mort certaine. Or, dans la mort par électrocution, la perte de connaissance, l'absence du pouls et l'arrêt respira-

toire ne sont pas des signes de mort. Théoriquement, par conséquent, c'est jusqu'aux lividités qu'on continuera ses efforts, et c'est pendant 2, 3, 4, 5 et 6 heures que pratiquement on tentera de ranimer l'électrocuté.

C'est un fait bien connu que des noyés restés une demi-heure sous l'eau ont pu être rappelés à la vie, après plusieurs heures de respiration artificielle : il en est de même pour les électrocutés.

Se contenter d'un abrégé de respiration artificielle constitue aujourd'hui une faute inexcusable.

Je voudrais qu'on eut entendu comme moi, de sa propre bouche, un ingénieur, frappé au cours d'une réparation dans une cabine de transformateur et « rescapé » grâce à la courageuse persévérance d'un de ses ouvriers, me décrire son angoisse, lorsque, à l'orée du retour de conscience, il perçut, comme lointaine et étouffée, la voix du second de ses collaborateurs qui s'écriait : « Maintenant, on peut le laisser, il ne reviendra plus ! »

Lorsqu'aura été décidé le transport de l'électrocuté dans un autre lieu, à l'hôpital par exemple, par voiture d'ambulance, on ne négligera pas de continuer les mouvements pendant le trajet.

On aura soin de toujours conserver le rythme de 16 inspirations par minute. Il faut, en effet, ne pas se presser et donner au sujet le temps de respirer.

Jellinek fait remarquer que les derniers mouvements respiratoires sont toujours suivis de mouvements d'ascension du larynx et de mouvements de déglutition. Le retour de la respiration est précédé de ces mêmes mouvements, de sorte qu'il faut porter grande attention à ces signes pendant les manœuvres de respiration artificielle et arrêter progressivement celle-ci pour laisser s'installer la respiration naturelle.

Pour activer et amplifier les mouvements respiratoires, on a associé à la respiration artificielle les *inhalations d'oxygène*, mais en raison de l'action stimulante sur les centres bulbaires de l'acide carbonique, action bien connue depuis les travaux des physiologistes Mosso et Yandell Henderson, on utilise de préférence le mélange d'oxygène avec 4 pour cent de Co^2, mélange connu sous le nom de carbogène.

Enfin dans certains cas, chez les congestifs en particulier, on devra, selon la suggestion de Cot et Jacob, avoir recours à la saignée.

Cette brève esquisse des soins immédiats à donner aux électrocutés mériterait d'être complétée par un aperçu du *côté chirurgical* de la question, puisque ce qu'on entend par brûlure électrique et qui est une désorganisation toute spéciale des tissus, essentiellement diffé-

rente de la brûlure thermique, se classe après l'asphyxie comme l'accident le plus redoutable de l'électricité. On sait du reste que la brûlure, si elle est assez étendue ou profonde, peut être plus ou moins rapidement suivie de mort.

Ici, ce qu'il importe au chirurgien de savoir, c'est que le plus souvent la réparation naturelle offre de sérieux avantages sur l'intervention chirurgicale. Les plaies d'origine électrique sont en général peu douloureuses et n'ont qu'une médiocre tendance à s'infecter. D'autre part, du fait que les tissus sphacélés s'éliminent au plus près sans nuire à la réparation des tissus épargnés, on aura le plus souvent intérêt à se défendre d'une décision hâtive et à laisser à l'évolution naturelle le soin d'accomplir une amputation économique. Valable pour d'autres variétés de brûlure, la sentence chirurgicale : « l'amputation du membre a été reconnue nécessaire » ne se justifie pas, complications exceptées, pour les brûlures électriques profondes.

L'ARC ÉLECTRIQUE ET SON APPLICATION A LA SOUDURE [1]

par M. G. Léonard.

Généralités. — Conduction métallique, électrolytique, gazeuse. — Conductibilité des gaz : ionisation par choc, potentiels de résonance et d'ionisation ; émission thermoionique ; théorie. — Décharge électrique dans les gaz : à basse pression avec cathode froide ; avec cathode chauffée ; décharge par arc ; colonne lumineuse ou positive ; chute de potentiel anodique ; rôle des ions positifs ; intensité minimum de maintien de l'arc.

PREMIÈRE PARTIE : L'ARC ÉLECTRIQUE

GÉNÉRALITÉS.

L'arc électrique est une des formes si variées du passage de l'électricité à travers les gaz, forme caractérisée par des phénomènes calorifiques et lumineux particulièrement accusés.

L'arc électrique est un phénomène très complexe. Plus on avance dans sa connaissance, plus le champ de ses applications s'élargit. La réalisation industrielle des redresseurs de grande puissance à vapeur de mercure a modifié profondément la technique de la transformation du courant alternatif en courant continu ; la mise au point de l'arc électrique de soudure est en train de révolutionner la technique de la construction mécanique et métallique.

L'arc renferme encore en puissance des possibilités immenses. Pour ne parler que de celles dont la mise au point industrielle ne paraît pas trop éloignée, nous citerons les redresseurs inversés (transformation du courant continu en alternatif) qui, lorsqu'ils seront réalisés à grande puissance conjointement avec les redresseurs directs à très haute tension, révolutionneront la technique des transports d'énergie à très grande distance ; les redresseurs à grille genre thyratron, qui transformeront la technique de l'appareillage de contrôle : relais de puissance, dispositifs de variation de tension, etc., etc.

Devant ce large horizon et les recherches intensives poursuivies dans les laboratoires, il ne semble pas aventureux de prédire que

(1) Ce rapport sera présenté à la Semaine de Discussions de novembre 1931.

dans le domaine de l'électricité industrielle, la deuxième partie du siècle actuel sera caractérisée par le développement intensif des applications de la décharge électrique dans les gaz et particulièrement de l'arc, comme la première partie l'a été par le développement prodigieux des applications des lois de l'induction électromagnétique.

Considéré du point de vue industriel, l'arc est, comme l'induction électromagnétique un moyen de transformation de l'énergie.

Dans les projecteurs, les lampes à vapeur de mercure, les lampes au néon, etc..., l'arc est un agent de transformation de l'énergie électrique en lumière ;

dans les fours électriques, la soudure électrique, un moyen de transformation d'électricité en chaleur ;

dans les redresseurs, directs ou inversés, un moyen de transformation du courant alternatif en courant continu et vice versa ;

dans les lampes à arc au tungstène, au fer ou au mercure dans le quartz fondu, un moyen de transformation d'électricité en radiations ultra-violettes, etc., etc.

L'arc joue d'autre part un rôle important dans le fonctionnement des interrupteurs, des parafoudres, dans la commutation des machines à courant continu, etc...

Aussi, tant au point de vue de sa meilleure utilisation qu'à celui de la suppression de ses inconvénients, l'étude du fonctionnement et des propriétés de l'arc est de la plus grande importance.

L'arc fut découvert par HUMPHRY DAVY au début du dix-neuvième siècle. En écartant deux électrodes horizontales en charbon préalablement amenées au contact et réunies à une source d'énergie électrique, il constata la formation d'un pont lumineux qui prit sous l'action du courant d'air chaud ascendant, une forme convexe vers le haut et auquel il donna pour cette raison le nom d'arc conservé depuis.

L'arc resta longtemps une curiosité de laboratoire. Ce n'est qu'à la réalisation industrielle de génératrices électriques dans la seconde partie du XIXe siècle, que l'arc reçut une première application pratique, celle de l'éclairage.

De nombreuses études furent consacrées pendant cette période à l'arc électrique au charbon, mais ne purent se limiter qu'aux caractères extérieurs, les connaissances sur la nature de l'électricité et la constitution de la matière n'étant pas assez avancées pour permettre l'explication scientifique du passage de l'électricité dans les gaz.

La découverte des électrons et l'influence qu'elle eut sur nos conceptions de l'atome, la découverte de l'émission thermoionique et de

l'ionisation des gaz, permirent d'étudier d'abord dans des décharges électriques de forme simple comme la décharge dans les gaz à basse pression, la nature intime du phénomène. On put de là passer à l'étude des formes plus complexes.

Avant d'exposer sommairement la théorie actuelle du fonctionnement de l'arc, nous dirons un mot de l'électron, des conceptions modernes de la constitution des atomes et des différentes formes d'ionisation.

L'Electron.

Pendant longtemps on ne considéra l'électricité que comme un des états énergétiques de l'éther. Les lois de l'induction de Faraday, fondement de nos machines modernes et celles des champs de déplacement de Maxwell, fondement de la T. S. F., ont été établies sur cette hypothèse.

Mais l'étude des phénomènes d'électrolyse et plus particulièrement ceux de la décharge électrique dans les gaz, montrèrent que l'électricité, comme la matière, était de structure atomique.

De même que les corps simples sont composés d'atomes comme parties constitutives indivisibles, l'électricité est composée de particules très petites appelées électrons.

La quantité d'électricité représentée par un électron, est infiniment petite comparée à celle couramment utilisée dans les applications industrielles, comme l'est d'ailleurs l'atome comparé à la plus petite quantité de matière observable.

Ainsi, un ampère-seconde équivaut à $6{,}3 \times 10^{18}$ électrons. L'électron correspond à la quantité d'électricité transportée par l'ion hydrogène dans l'électrolyse.

La masse de l'électron a pu être déterminée par l'étude de la déviation de rayons cathodiques dans les tubes à vide, sous l'action d'un champ magnétique ou électrique. Cette masse est 1 845 fois plus petite que celle de l'atome d'H, c'est-à-dire qu'elle vaut $0{,}899\ 10^{-27}$ gramme.

Les électrons sont d'une extrême petitesse par rapport aux atomes ; en leur supposant une forme sphérique, le rayon serait environ 50 000 fois plus petit que celui de l'atome.

Un électron négatif ne peut être produit sans faire apparaître aussitôt une charge positive de même valeur appelée quelquefois proton.

L'électron négatif a pu être facilement isolé, tandis que le proton,

toujours lié à un atome de matière, se comporte comme un ion positif, terme sous lequel il est souvent désigné.

Constitution de l'atome.

L'étude de l'électron a bouleversé l'ancienne conception classique de la constitution de la matière.

L'atome, que l'on croyait insécable, serait en réalité constitué comme un système planétaire, par un noyau central chargé positivement, autour duquel graviteraient des électrons négatifs.

L'atome d'hydrogène serait constitué par un proton comme noyau autour duquel tournerait un électron négatif.

Le volume de l'électron négatif est excessivement petit. Le rapport du rayon de l'électron à celui de l'atome serait comparable à celui du rayon de la terre au rayon de son orbite autour du soleil.

Au point de vue absolu, ces valeurs sont du domaine de l'infiniment petit, le rayon de l'atome étant de l'ordre de 10^{-8} centimètres.

On admet que, au millième près, la masse d'un atome est celle des protons que son noyau renferme. Ainsi dans l'atome d'hydrogène, la masse serait pratiquement concentrée dans l'unique proton du noyau. La quantité d'électricité du proton étant la même que celle de l'électron, l'augmentation de masse ne peut s'expliquer que par une concentration plus grande de la charge, c'est-à-dire, si on représente le proton par une sphère, par une réduction considérable de son rayon. Ce rayon serait près de 2 000 fois plus petit que celui de l'électron négatif.

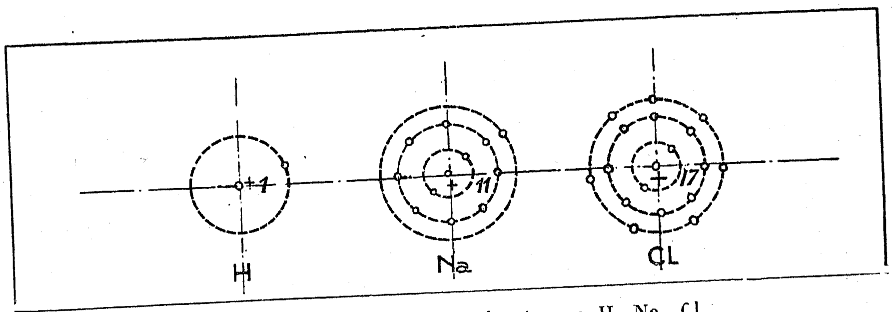


Fig. 1. — Schéma des trois atomes H, Na, Cl

L'hydrogène dont le poids atomique est un (1,008 exactement) a un proton comme noyau et un électron extérieur.

Le sodium, dont le poids atomique est 23 à 23 protons dans le noyau. L'atome étant neutre, 23 électrons négatifs doivent neutraliser les

charges positives du noyau. 12 de ces électrons sont situés dans le noyau pour maintenir énergiquement ensemble les charges positives et 11 extérieurs, animés d'un mouvement de rotation rapide autour du noyau positif.

Le chlore a 17 charges positives libres dans le noyau. Ces charges sont neutralisées par 17 électrons extérieurs.

Les atomes des 88 corps simples actuellement connus sont constitués en nombre variable de protons et d'électrons animés de mouvements rapides.

Les phénomènes physiques (électriques, calorifiques et lumineux) ainsi que les phénomènes chimiques, se produisent dans la région des orbites électroniques, le noyau de chaque atome ne subissant aucune modification.

Le noyau ne se transforme que dans les substances radio-actives en donnant naissance à une matière de nature différente.

Conduction métallique, électrolytique et gazeuse.

Nous avons vu que, dans la conception planétaire de l'atome, des électrons négatifs tournent autour d'un noyau positif. Les orbites de ces électrons en mouvement sont plus ou moins rapprochées de ce noyau.

Pour certaines substances, comme les métaux, les électrons des orbites extérieures sont faiblement attachés au système de l'atome, à tel point qu'on peut presque considérer ces électrons comme libres.

Si un champ électrique est appliqué au métal, les électrons libres sont déplacés dans le même sens en sautant d'atome en atome. Le courant électrique qui prend naissance dans un métal sous l'action d'un champ électrique, serait donc dû à un déplacement d'électrons négatifs, les centres positifs restant immobiles.

Ce flux d'électrons circule en sens inverse de celui adopté dans l'électrodynamique classique.

La conductibilité électrolytique est de tout autre nature ; elle est due au transport de charges positives et négatives par des ions se déplaçant en sens inverse sous l'action du champ électrique. On admet que dans un électrolyte, des ions de signe opposé se forment et se combinent continuellement, de telle sorte qu'à chaque moment il existe une grande quantité d'ions non combinés sur lesquels peut s'exercer l'action d'un champ électrique.

La conductibilité des gaz est de forme plus complexe. Elle participe à la fois de la conductibilité métallique et de la conductibilité électrolytique.

CONDUCTIBILITÉ DES GAZ.

Les gaz et les vapeurs sont, à l'état normal, mauvais conducteurs de l'électricité. Ils deviennent conducteurs sous l'action de certains agents physiques (rayons X, radiations ultra-violettes, très hautes températures, etc.).

Ce phénomène est appelé ionisation. Il a pour effet d'expulser, des atomes neutres du gaz ou de la vapeur un ou plusieurs électrons négatifs, le reste des atomes restant chargé positivement.

Les charges négatives et positives ainsi séparées se déplacent sous l'action d'un champ électrique, les électrons négatifs vers le pôle + ou anode et les électrons positifs vers le pôle — ou cathode, ce mouvement assurant le passage du courant.

Mais la cause principale de la conductibilité des gaz ou des vapeurs réside dans l'ionisation par choc.

Ionisation par choc. — Potentiel de résonance. Potentiel d'ionisation.

Les électrons et les ions positifs sont capables d'ioniser par choc les molécules à l'état neutre quand leur énergie cinétique $1/2\ mv^2$, m étant leur masse et v leur vitesse, est au moins égale à l'énergie qu'il est nécessaire de dépenser pour chasser un électron (2) de l'atome.

Les ions et les électrons doivent leur vitesse dans un champ électrique au potentiel électrique qu'ils peuvent franchir sans frapper d'autres molécules. On appelle la distance ainsi franchie, leur « libre parcours ».

Si e est la charge électrique de l'ion ou de l'électron, V la différence de potentiel parcourue sans choc, nous aurons en supposant qu'initialement la vitesse était nulle

$$1/2\ mv^2 = eV$$

$$v = \sqrt{\frac{2e}{m}}\,V = c\sqrt{V},$$

où c est une constante.

La vitesse est donc proportionnelle à la racine carrée de la différence de potentiel parcourue sans choc. On a pris l'habitude d'exprimer ces vitesses par les différences de potentiel correspondantes qui les produisent.

(2) On emploie souvent le terme « électron » seul pour désigner l'électron négatif.

Si le choc se produit avant que la vitesse de l'électron ait atteint une certaine valeur, l'électron rebondit élastiquement dans une direction quelconque. Son énergie n'est pratiquement pas modifiée, sa masse étant très faible par rapport à celle de l'atome.

Si la vitesse de l'électron atteint une valeur qui correspond au potentiel de résonance, lequel est une caractéristique de l'atome avec lequel il entre en collision, le choc n'est plus élastique. L'électron communique son énergie à l'atome. L'effet sur l'atome est de modifier l'orbite de l'un de ses électrons sans le chasser de la zone d'action de l'atome. L'atome est dit en « état d'excitation ». En retournant à son orbite normale, l'électron déplacé oscille autour de sa position moyenne en rayonnant l'énergie acquise dans le choc. Ce rayonnement s'effectue sous forme de radiations électromagnétiques, qui pour certaines fréquences rentrent dans la zone visible.

Ce phénomène est la source de la plus grande partie de la luminosité des tubes à vide.

Si la vitesse de l'électron atteint, avant la collision avec un atome une vitesse correspondant au « potentiel d'ionisation » il perd dans le choc l'énergie correspondant à ce potentiel.

L'effet du choc sur l'atome est d'expulser un électron de l'orbite extérieure, le moins lié au système de l'atome. L'atome reste avec une charge positive et forme un ion positif se déplaçant vers la cathode.

L'électron de choc ayant perdu la plus grande partie de son énergie, continue son trajet vers l'anode jusqu'au moment où après plusieurs chocs élastiques, il emmagasine à nouveau une énergie suffisante pour ioniser un autre atome, à moins qu'il atteigne auparavant l'anode où il est absorbé.

Le nouvel électron arraché à l'atome emmagasine de l'énergie dans le champ électrique comme l'électron qui l'a libéré, et devient capable à son tour d'ioniser les atomes.

La différence de potentiel produisant la vitesse minimum nécessaire pour ioniser par choc les atomes ou les molécules est appelée « potentiel d'ionisation ».

Cette valeur dépend de la nature du gaz et est indépendante de sa pression et de sa température (sauf aux très hautes températures où l'ionisation peut prendre naissance spontanément).

Les ions positifs ayant une grosseur de même ordre que les molécules, auront un libre parcours moyen plus petit que celui des électrons. La charge étant la même, l'énergie emmagasinée jusqu'au choc sera plus petite. De plus, les ions positifs ont un pouvoir ioni-

sant inférieur à celui des électrons ; leur potentiel d'ionisation sera de ce fait plus grand.

Le tableau ci-dessous donne, en volts, quelques valeurs des potentiels de résonance et du potentiel d'ionisation pour quelques gaz :

Gaz	Nombre atomique	Symbole	Potentiels de résonance	Potentiels d'ionisation	
				Electrons	Protons
Helium	2	He	19,75-20,45	24,5	
Néon	10	Ne	16,65-18,45	21,5	
Argon	18	A	11,55-13-14	15,3	
Oxygène	8	O		13,56-(15,5)	
Hydrogène	1	H		13,53-(15,9)	54
Phosphore	15	P		(13,3)	
Azote	7	N		10,8-(16,9)	440
Mercure	80	Hg	4,66-4,86-5,43-6,7	10,39	
Soufre	16	S		(10,31)	
Zinc	30	Zn		9,35	
Silicium	14	Si		8,50	
Cuivre	29	Cu		7,69	
Argent	47	Ag		7,54	
Fer	26	Fe		7,4	
Manganèse	25	Mn		7,4	
Plomb	82	Pb		7,39	
Molybdène	42	Mo		7,1	
Chrome	24	Cr		6,7	
Titane	22	Ti		6,5	
Calcium	20	Ca		6,09	
Aluminium	13	Al		5,96	
Baryum	56	Ba		5,19	
Sodium	11	Na		5,12	
Potassium	19	K		4,10	
Caesium	55	Cs		3,90	
Acétylène		C^2H^2		(12,3)	
Oxyde de carbone		CO		(14,3)	
Acide carbonique		CO^2		(14,3)	

Les valeurs entre parenthèses sont relatives aux molécules.

On remarquera que certains atomes ont plus d'un potentiel de résonance et par conséquent plus d'une fréquence d'émission.

L'ionisation peut quelquefois être produite par des électrons qui n'ont pas atteint la vitesse correspondant au potentiel d'ionisation quand ils viennent frapper un atome en état d'excitation. Il suffit dans ce cas, que l'électron fournisse l'énergie complémentaire pour chasser de l'atome l'électron qui a déjà été déplacé de son orbite normale.

Emission thermo-ionique.

On sait, depuis plus de deux siècles, que l'air devient conducteur au voisinage de métaux portés à haute température.

Plus tard, EDISON avait remarqué l'émission d'électricité négative par un fil de carbone incandescent placé dans un vide élevé.

Mais ce n'est qu'assez récemment que l'étude de ces phénomènes a pu être approfondie.

On est arrivé à la conclusion que l'électricité négative, qui provient des solides incandescents, est transportée par des électrons émanant de ces solides, électrons identiques à ceux qui portent l'électricité négative dans les rayons cathodiques.

Les électrons provenant des solides incandescents ne peuvent être émis que si ces solides sont pris comme cathode. Le courant ne peut donc passer que dans un seul sens, celui où le solide est pris comme pôle négatif.

Ce courant ne suit pas la loi d'Ohm. Au début, il croît avec la f. e. m., puis atteint une valeur de saturation au delà de laquelle il ne croît plus lorsque la f. e. m. augmente, à condition que cet accroissement ne soit pas suffisant pour permettre au champ électrique lui-même de provoquer l'ionisation.

La valeur maximum du courant de saturation croît très rapidement avec la température et peut atteindre plusieurs ampères par cm^2 avec un filament de carbone porté à son plus haut degré d'incandescence.

Théorie de l'émission thermo-ionique.

Nous avons vu que dans la conception planétaire de l'atome, des électrons négatifs tournent autour d'un noyau positif et que pour certaines substances comme les métaux, les électrons des orbites extérieures sont faiblement attachés au système de l'atome, à tel point qu'on peut presque considérer ces électrons comme libres.

Ces corpuscules peuvent se mouvoir librement autour des atomes du métal et semblent se comporter comme un gaz parfait renfermé dans le métal.

Les électrons sont retenus par celui-ci parce que, chaque fois qu'un électron sort du métal il laisse derrière lui une charge positive libre qui exerce un attraction électrostatique, le maintenant au voisinage de la surface du métal.

Il suffit que l'excès du potentiel du métal sur le milieu ambiant soit de 1/100 de V environ à zéro degré centigrade pour arrêter les électrons à sa surface.

Mais lorsque la température du métal s'élève, la vitesse des électrons augmente. Si l'énergie cinétique moyenne d'un électron est comme

celle d'une molécule gazeuze, porportionnelle à la température absolue, des électrons de plus en plus nombreux pourront s'échapper du métal.

Si un champ électrique enlève tous les électrons au fur et à mesure de leur sortie du métal, l'intensité du courant ainsi produit croîtra avec la température.

La formule suivante, établie par Richardson en s'appuyant sur des considérations théoriques, donne pour chaque température la valeur du courant de saturation :

$$I = a\, T^{1/2}\, e^{-\frac{b}{T}}$$

où I est le courant en ampère par cm² de surface,

T la température absolue,

e la base des logarithmes népériens,

a et *b* deux constantes.

Les résultats d'expériences vérifient cette formule dans un vide assez élevé où les chocs des électrons sur les molécules résiduelles peuvent être négligés.

Le tableau ci-après donne pour le tungstène pour les valeurs de I par cm² correspondant à diverses valeurs de la température.

T en degrés absolus	I en ampères par cm²
1 500	0,58 10^{-6}
2 000	0,0042
2 500	0,891
3 000	31,7

On remarquera l'augmentation extrêmement rapide de l'intensité en fonction de la température..

La valeur de l'émission électronique dépend, à la même température, de la nature de la substance.

Ainsi l'émission du sodium est plus grande que celle du platine à la même température et peut même être décelée à des températures inférieures à 300° C.

Dans les lampes de T. S. F. on utilise cette propriété de certains oxydes de métaux alcalino-terreux d'émettre des électrons à température plus basse que le tungstène.

Le tableau ci-après donne, pour quelques substances, les valeurs de *a* et de *b* qui dépendent de la nature de la substance, les valeurs de

I de la formule de Richardson étant exprimées en ampères par cm² :

	a	b
Tungstène.	$24,8 \times 10^6$	52 500
Molybdène.	22×10^6	50 000
Platine.	$11,5 \times 10^6$	51 100
Carbone.	$2,38 \times 10^6$	48 700
Thorium	2×10^8	39 000
Nickel.	$4,84 \times 10^6$	34 000
Sodium.	$1,6 \times 10^{12}$	31 600

Décharge électrique dans les gaz.

Si on établit entre deux électrodes plongées dans un gaz, une différence de potentiel croissante, on constate qu'une décharge se produit pour une certaine valeur de ce potentiel. La valeur la plus faible du potentiel qui produit cette décharge est appelée « potentiel disruptif ».

On constate, d'autre part, que s'il faut plusieurs milliers de volts pour provoquer la décharge à la pression atmosphérique avec une cathode froide, il ne faut seulement que quelques dizaines de volts avec une cathode portée à l'incandescence.

Mais la décharge électrique dans les gaz à haute pression ou à la pression atmosphérique est un phénomène trop complexe pour que son étude directe ait pu permettre d'en faire connaître les caractères fondamentaux.

On a dû commencer par l'étude du phénomène de la décharge dans les gaz raréfiés qui en est une forme simplifiée.

On a pu ainsi déterminer les caractères communs aux différentes formes de décharge, et en appliquer les résultats à l'étude de l'arc électrique lui-même.

Décharge à travers les gaz à basse pression avec cathode froide. — La différence de potentiel nécessaire pour produire la décharge entre les électrodes d'un tube dans lequel on peut faire varier la pression d'un gaz, diminue rapidement avec la pression jusqu'à une certaine valeur de cette dernière, puis augmente ensuite.

Ce potentiel explosif ne dépend, toutes choses égales d'ailleurs, que du produit $p \times l$ de la pression p du gaz par la distance l des électrodes (loi de Paschen).

Les courbes de la figure 2 donnent, pour différents gaz, la variation de la tension explosive en fonction du produit $p \times l$.

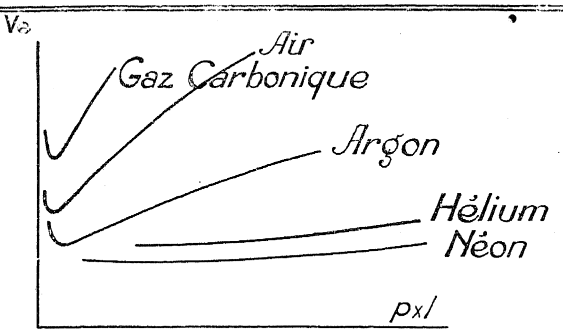


Fig. 2. — Variation de la tension disruptive dans les gaz en fonction du produit $p \times l$; p, pression des gaz; l, distance entre électrodes.

Si, le tube étant amorcé, le courant est maintenu à une faible valeur entre les électrodes de l'ordre du milli-ampère, on a pour des pressions de l'ordre du millimètre de Hg la lueur bleue très connue du tube de Geissler. Si l'air du tube est remplacé par un autre gaz, la lumière aura une autre couleur correspondant au spectre du gaz employé.

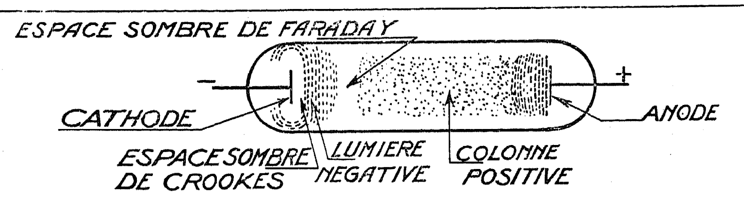
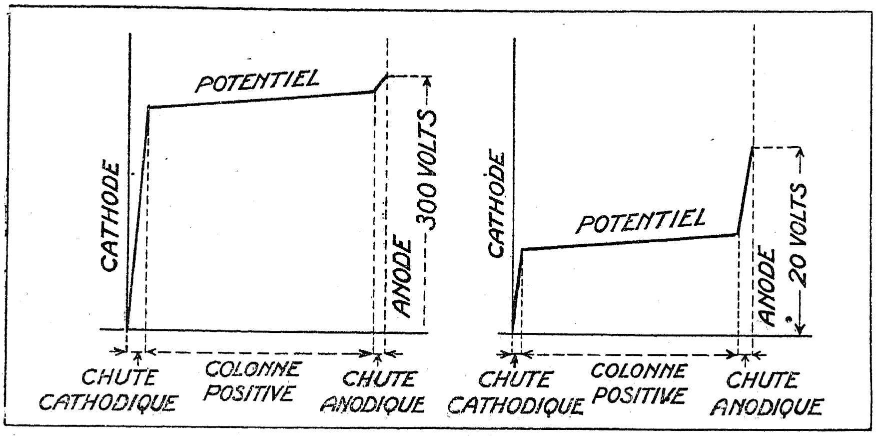


Fig. 3. — Aspect de la décharge dans un tube à gaz raréfié.

En partant de la cathode (fig. 3) on remarque une très faible couche lumineuse qui peut s'étendre sur toute sa surface si l'intensité du courant est suffisante ; puis un espace sombre appelé espace sombre de Crookes suivi par une lueur dite lueur négative. Un espace obscur, dit espace sombre de Faraday, sépare la lueur négative de la colonne lumineuse appelée colonne positive qui s'étend jusqu'à l'anode.

Le champ électrique entre les deux électrodes n'y est pas constant. La figure 4 donne la répartition du potentiel entre les électrodes d'un tube de Geissler. (Par comparaison, la figure 5 donne la répartition du potentiel dans un arc.) On remarque une grande chute de potentiel au voisinage de la cathode ainsi qu'une moins marquée au voisinage de l'anode.



Répartition du potentiel.

Fig. 4. Dans un tube de Geissler.

Fig. 5. Dans un arc.

La raison de cette différence de répartition du potentiel, que l'on constate également dans l'arc est due aux charges d'espaces, c'est-à-dire aux particules électriques + ou — non compensées par des charges de signe contraire.

Si nous considérons d'abord un conducteur métallique de section uniforme et que nous appliquions entre deux de ses points une différence de potentiel, nous constaterons que la chute de potentiel y est proportionnelle à la distance et que par conséquent, le champ électrique y est constant. Ceci est dû à ce que, dans toute section considérée il y a autant de charges positives que de charges négatives, donc charge d'espace nulle.

Considérons maintenant un gaz ionisé entre deux plateaux métalliques en l'absence de tout champ électrique. Dans tout volume considéré de ce gaz il y a autant de charges + que de charges —. Il n'y a donc pas de charge d'espace.

Appliquons maintenant une différence de potentiel entre les deux plateaux. Les charges négatives vont se déplacer vers l'anode et les charges positives vers la cathode. Dans toute section de passage entre les plateaux, il y a autant d'électrons négatifs qui entrent d'un

côté et sortent de l'autre. Le nombre d'électrons ne change pas dans la section considérée.

Le nombre des charges positives restant également le même, il n'en résulte pas de charge d'espace.

Considérons maintenant la région au contact immédiat de la cathode. Les électrons négatifs, formés dans le gaz au contact avec la cathode, s'éloignent de cette cathode; mais si la cathode est froide, les électrons négatifs ne peuvent en sortir.

Comme les ions positifs se déplacent vers la cathode et qu'à son contact presque immédiat il n'y a pas d'électrons négatifs, il en résultera une charge positive.

Le même phénomène se produira à l'anode, mais avec une charge négative.

Ces charges d'espace avoisinant la cathode et l'anode ont pour effet de renforcer le champ électrique dans ces régions, aux dépens de celui existant dans l'espace intermédiaire.

La grande chute de potentiel au voisinage de la cathode joue le principal rôle. Elle permet aux ions positifs qui se déplacent vers elle, d'acquérir dans cette chute cathodique une énergie suffisante pour ioniser les atomes de la cathode ou de la pellicule de gaz à son contact immédiat.

Les électrons ainsi expulsés de la surface de cette cathode, sont accélérés par cette même chute cathodique et deviennent capables à leur tour d'ioniser par choc les molécules de gaz sitôt que leur énergie cinétique atteint une valeur suffisante. Les électrons ainsi libérés se joignant aux électrons de choc se dirigent vers l'anode et les ions positifs vers la cathode, ce déplacement assurant le passage du courant.

Fonctionnement avec cathode chauffée. — Si nous portons la cathode précédente à haute température, en la constituant par exemple par un filament de tungstène porté à l'incandescence par le passage d'un courant séparé, nous provoquons l'effet thermo-ionique, c'est-à-dire l'émission d'électrons par la cathode.

Nous constatons aussitôt que la chute de tension cathodique diminue dans de fortes proportions. Ainsi, dans un tube au néon, où la chute cathodique avec cathode froide est de plus de 300 V, cette valeur se réduit avec cathode chaude à 25 V environ.

Dans la colonne positive et l'anode, la chute de potentiel ne change pas.

Ce type de décharge à cathode chaude, est utilisé dans certains

tubes luminescents et dans certains redresseurs à arc (redresseurs Tungar).

Décharge par arc. — Mais, au lieu de chauffer la cathode par un courant séparé, nous pouvons la porter à l'incandescence en augmentant l'intensité du courant direct qui la parcourt.

Par l'accroissement de ce courant, nous augmentons le nombre d'ions positifs venant frapper la cathode.

Les ions positifs cédant à cette dernière une grande partie de leur énergie cinétique sous forme de chaleur, pour un certain nombre d'entre eux, venant la frapper, cette cathode sera portée à l'incandescence.

A ce moment se produit l'amorçage de l'arc qui se traduit principalement par une chute brusque de tension entre les électrodes.

Cette chute brusque de tension correspond au moment où la cathode émet en abondance des électrons qui, accélérés par la chute cathodique, ionisent les molécules du gaz avec lesquelles ils entrent en collision.

Pour ioniser les molécules il suffit, comme l'expérience le confirme, que la chute cathodique corresponde, dans le cas de l'arc, au potentiel d'ionisation du gaz séparant les électrodes.

Cette chute cathodique sera un minimum au-dessous duquel ne pourra pas descendre la tension d'alimentation des électrodes ; mais dans le cas de la cathode froide ; ce minimum sera de quelques centaines de volts, tandis que pour l'arc il sera compris entre 10 et 20 V seulement. La chute de tension dans le reste de la décharge est sensiblement la même dans les deux cas.

La densité du courant à la cathode est très différente dans l'arc et dans la décharge avec cathode froide ; elle est approximativement de 10 ampères par cm² avec cathode froide, de 500 ampères pour l'arc au charbon dans l'air et de 4 000 ampères pour l'arc au mercure à basse pression.

Colonne lumineuse de l'arc ou « colonne positive ». — La colonne positive, ou noyau de l'arc, conserve les mêmes propriétés dans l'arc que dans la décharge dans un tube à basse pression avec cathode froide.

Les ions des deux signes s'y trouvent en nombre égal, le champ électrique y est uniforme et par conséquent la chute de tension proportionnelle à la longueur de l'arc. Toutefois, le champ électrique y est trop faible et le « parcours libre » trop petit pour expliquer l'ionisation par choc.

Il semble tout au moins pour l'arc, que l'explication de cette ionisation soit trouvée dans la haute température à laquelle est portée la colonne positive.

D'après Soha, un physicien indien, les gaz non conducteurs jusqu'à une certaine température deviendraient rapidement conducteurs à partir d'une certaine température dépendant de leur nature. Cette conductibilité serait provoquée par l'ionisation par choc due à la grande agitation thermique aux hautes températures.

Ainsi pour l'oxygène et l'azote, la température pour une grande conductibilité serait de 10 à 12 000 degrés centésimaux. Ce sont des températures prodigieuses qu'on ne peut probablement atteindre que dans l'arc. Pour des vapeurs métalliques, ces températures seraient plus basses : pour le sodium et le potassium dans les environs de 2 000° C, pour le cuivre de 6 000° C et pour le carbone de 3 à 4 000° C.

Ainsi, la haute température des gaz ou des vapeurs de la colonne positive semblerait être une condition indispensable de l'existence de l'arc.

Chute de potentiel anodique. — L'anode semble jouer dans l'arc un rôle bien moins important que la cathode.

Un arc peut subsister avec une anode froide : on a montré, par exemple, qu'un électrolyte qui se vaporise à 100° C, peut servir d'anode à un arc.

La chute anodique peut être positive ou négative. D'après la théorie de Langmuir, le courant traversant l'anode serait la différence entre le nombre d'électrons et le nombre d'ions positifs venant frapper l'anode dans leurs mouvements désordonnés semblables à ceux des molécules d'un gaz. Si les électrons donnent un courant plus grand que celui du circuit extérieur, l'anode se chargera négativement pour diminuer le nombre d'électrons venant l'atteindre. Il en résultera une chute de tension anodique négative. Si, au contraire, le nombre d'électrons venant frapper l'anode est insuffisant, une chute anodique positive prendra naissance pour les accélérer et en augmenter le nombre, cette chute anodique se réglant automatiquement pour égaliser au courant extérieur le courant dû aux électrons captés.

Cette théorie explique d'une façon satisfaisante pourquoi une même anode d'un arc au mercure à faible pression parcourue par le même courant, est portée à une température plus élevée quand on augmente le diamètre du tube. Dans ce cas, une plus petite fraction

du courant électronique d'agitation est capté par l'anode et une chute anodique positive plus élevée est nécessaire pour accélérer et augmenter le nombre des électrons venant frapper l'anode. La vitesse de ces électrons étant augmentée du fait de cette plus grande chute anodique, le bombardement qui en résulte dégage une plus grande quantité de chaleur à la surface de l'anode, d'où échauffement plus élevé.

Rôle des ions positifs dans l'arc. — Nous avons vu que la tension disruptive entre deux électrodes placées dans un tube à vide très poussé (pression de l'ordre du millième de millimètre de mercure) était très élevée quand la cathode était froide. Un champ électrique de 10^6 à 10^7 V par centimètre semble nécessaire près de la surface de la cathode pour en extraire les électrons.

Quand la cathode est incandescente, elle émet un flux d'électrons qui permet le passage d'un courant sous des valeurs relativement faibles de la tension entre électrodes. Dans les vides élevés, le libre parcours des électrons (c'est-à-dire la distance franchie sans choc avec les molécules) peut être plus grand que la distance séparant les électrodes. Il n'y a pas d'ionisation par choc et le courant est purement électronique.

La charge d'espace qui résulte de la présence des seuls électrons entre les électrodes limite considérablement, par les actions répulsives qui en résultent, la valeur du courant.

Ce mode de décharge est utilisé dans les kénotrons ou soupapes électroniques, dans les ampoules à rayons X type Coolidge, etc., et ne permet pratiquement que le passage d'un courant très limité habituellement inférieur à l'ampère.

Dans l'arc, qui ne peut se produire que si la pression du milieu est suffisante, les ions positifs formés par l'ionisation par choc des gaz ou vapeurs séparant les électrodes, neutralisent la charge d'espace créée par les électrons et permettent de ce fait le passage de courants de milliers d'ampères sous des tensions très réduites.

La masse des ions positifs étant beaucoup plus grande que celle des électrons (un ion positif de mercure par exemple, a une masse 370 000 fois plus grande que celle de l'électron) leur vitesse dans le champ électrique de l'arc sera beaucoup plus faible que celle des électrons. La vitesse dans le champ électrique variant en raison inverse de la racine carrée de la masse, l'électron aura par exemple une vitesse 605 fois plus grande que celle de l'ion positif de mer-

cure. Il en résulte que, dans l'arc, la plus grande partie du courant est constituée par le déplacement des électrons.

On se rapproche, en somme, de la conductibilité métallique où le courant est constitué par le déplacement des électrons seuls, les centres positifs restant immobiles et n'agissant que pour neutraliser la charge d'espace.

Les ions positifs ont également un rôle important dans l'arc, en bombardant la cathode pour la maintenir à l'incandescence.

Non seulement ils favorisent le passage du flux électronique en neutralisant la charge d'espace dans la colonne de l'arc, mais ils augmentent l'émission thermo-ionique de la cathode en créant, à son contact immédiat, un champ électrique positif très intense.

En somme, si les ions positifs interviennent très peu dans le transport proprement dit des charges électriques qui constitue le courant, ils n'en jouent pas moins, par leur présence, le rôle principal dans le fonctionnement de l'arc, à tel point que ce qui caractérise principalement l'arc par rapport aux autres formes de décharge électrique est la présence, dans le circuit de la décharge par arc, d'une forte densité d'ions positifs.

Intensité minimum de maintien de l'arc. — Nous avons vu que l'échauffement de la cathode était produit dans l'arc par le bombardement des ions positifs. Pour la maintenir à l'incandescence, il faudra donc qu'un nombre minimum d'ions viennent la frapper.

Il y aura par suite une valeur du courant au-dessous de laquelle l'arc ne pourra subsister, et ce courant sera d'autant plus grand que l'électrode sera plus refroidie. C'est ainsi qu'il est beaucoup plus difficile de maintenir un arc entre métaux qu'entre charbons, à cause de la plus grande conductibilité thermique des premiers.

En résumé l'existence de l'arc est liée à celle d'une pression suffisante du milieu gazeux permettant une production intensive d'ions positifs, d'un point incandescent sur la cathode nécessitant une intensité minimum de courant et d'un minimum de tension correspondant à la somme des chutes anodique et cathodique.

LA PROTECTION SÉLECTIVE DES RÉSEAUX CONTRE LES COURTS-CIRCUITS AU MOYEN DE COURANTS DE HAUTE FRÉQUENCE (1)

par M. J. Fallou.

Introduction : rappel des conditions impératives d'un système de protection contre les courts-circuits dans un grand réseau de transport ; cas particulier d'un réseau bouclé à une seule file de lignes de grande longueur. — I. Avantages et modes d'emploi des courants de haute fréquence en vue de la protection sélective — II. Dispositifs différentiels a liaisons par courants porteurs : Vedovelli ; Fitzgerald. — III. Dispositif à relais wattmétriques de déséquilibre ; système de l'auteur. — Dispositifs à ondes de contrôle. Impédance apparente d'une ligne en haute fréquence.

Introduction. — Au cours d'un récent rapport, nous avons eu l'occasion de développer assez longuement ce que nous avons appelé les « conditions impératives » auxquelles doit satisfaire le système de protection contre les courts-circuits dans un grand réseau de transport d'énergie (2). En conclusion, nous avons estimé qu'un système idéal doit assurer la sélection des déclenchements en répondant aux cinq conditions essentielles suivantes :

1° Permettre la marche en parallèle de toutes les lignes existantes et laisser la possibilité d'effectuer des bouclages.

2° Permettre l'interconnexion d'un nombre quelconque de réseaux avec le réseau protégé, sans nécessiter la modification des connexions ou du réglage des relais.

3° Fonctionner même dans le cas où le courant de défaut n'atteint pas la valeur du courant normal de la ligne.

4° Rester inactif en cas de surcharge proprement dite.

5° Fonctionner instantanément.

Dans l'état actuel de la technique, les systèmes à fils pilotes et leurs

---

(1) Ce rapport sera présenté à la séance de novembre de la 4e Section et sera discuté à la Semaine de Discussions de novembre 1931

(2) Rapport sur la Protection sélective des lignes aériennes et souterraines contre les courts-circuits. Congrès international des producteurs et distributeurs d'énergie electrique. Paris 1928.

dérivés d'une part, et les systèmes différentiels par lignes en parallèle d'autre part, fournissent des solutions compatibles avec ces cinq principes fondamentaux.

Mais le problème de beaucoup le plus délicat à résoudre est celui de la protection d'un réseau bouclé à une seule file de lignes dans lequel la longueur des feeders exclut la possibilité pratique d'utiliser des fils pilotes, et où les dispositifs différentiels ne peuvent trouver leur emploi faute d'un nombre de lignes suffisant entre les différents postes.

Pour résoudre ce dernier problème, on a développé au cours de la dernière décade un nouveau type de relais — relais d'impédance ou de réactance — dont l'intérêt est indiscutable, mais qui ne constitue pas encore, à notre avis, la solution idéale lorsqu'il s'agit de réseaux de transport très importants, dans lesquels la stabilité de fonctionnement doit être sauvegardée à tout prix.

De par leur principe même, ces relais introduisent toujours une temporisation plus ou moins grande des déclenchements, et ne possèdent donc pas la très grande rapidité d'action dont nous avons souligné la nécessité en énonçant la condition 5.

On sait, en effet, que les courts-circuits sur les lignes, constituent un des facteurs les plus importants pour réduire la stabilité de fonctionnement d'un transport d'énergie, et que si l'on veut éviter le décrochage des machines synchrones lors d'un incident de ce genre, il est extrêmement utile de pouvoir éliminer ce court-circuit en un temps inférieur à la demi-période d'oscillation pendulaire de ces machines, c'est-à-dire, le plus généralement en moins d'une demi-seconde. Les conditions de stabilité d'un réseau pourront être notablement améliorées si l'on parvient à gagner un pourcentage appréciable sur la durée des courts-circuits, dans les premiers dixièmes de seconde du régime troublé.

Les constructeurs d'appareillage ont compris l'intérêt de ce problème et peuvent réaliser aujourd'hui des appareils déjà très rapides. Certains réseaux américains à 220 kV sont déjà équipés avec des disjoncteurs capables de couper les courts-circuits en moins de 0,15 seconde, alors que les anciens appareils nécessitent un délai trois fois plus long.

Il est donc indispensable que de leur côté, les spécialistes en matière de protection de réseaux portent tous leurs efforts vers la réalisation de dispositifs de sélection de plus en plus rapides : il nous semble que ce problème doive trouver un grand nombre de solutions grâce à l'utilisation de courants de haute fréquence superposés au courant normal

(courants porteurs) sur les lignes de transport d'énergie. La technique de ces courants porteurs est actuellement bien au point, et couramment employée pour la téléphonie à grande distance le long des lignes; leur application à la protection a d'ailleurs, d'ores et déjà, reçu la sanction de la pratique sur certains réseaux (1), sous une forme à laquelle on peut peut-être reprocher encore une certaine complication, mais qui n'en démontre que mieux les possibilités d'utiliser les courants porteurs à la protection sélective instantanée des réseaux.

I. — *Avantages et modes d'emploi des courants de haute fréquence en vue de la protection sélective.*

L'application des courants porteurs à la protection des réseaux, tire ses avantages de deux propriétés essentielles qui sont :

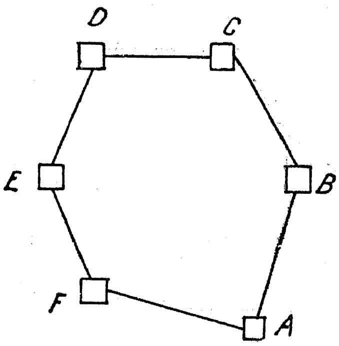


Fig 1.

1° La sélection possible par résonance de courants à fréquence élevée en utilisant un nombre suffisant des fréquences différentes.

2° La possibilité de localiser entre deux points précis la propagation de ces courants porteurs.

Considérons par exemple un réseau bouclé comprenant une série de lignes AB — BC.....EF. (fig. 1); en utilisant un nombre suffisant d'ondes porteuses de fréquences différentes et des systèmes de réception accordés respectivement sur ces différentes fréquences, on peut toujours s'arranger pour qu'un signal émis du poste A soit reçu par exemple à l'extrémité B du feeder AB, et laisse indifférents les récepteurs situés aux autres postes C, D, E, F. De même, un signal émis d'un autre poste quelconque D, et transporté par un courant de fré-

(1) *Electrical World*, 22 mars 1930.

quence différente, pourra n'être reçu que par un seul récepteur, C ou E par exemple.

Mais il y a plus. En installant sur les conducteurs de la ligne, à chacune de ses extrémités, un « circuit bouchon » accordé pour la fréquence du courant porteur injecté dans cette ligne, la propagation de ce courant porteur sera limitée à la ligne elle-même et ne pourra pas se transmettre vers les lignes voisines situées en amont ou en aval.

L'utilisation de courants porteurs permet donc de diviser un réseau quelconque A, B, C, D,...., si complexe soit-il, en autant d'éléments simples que l'on désire, et par conséquent d'individualiser chacune des lignes, soit pour lui faire transmettre un signal (la ligne devient alors un fil pilote pour la fréquence du courant porteur), soit pour mesurer directement et continuellement ses caractéristiques à la fréquence du courant porteur.

Il ressort de là que l'on peut fonder, sur l'application de courants de haute fréquence, deux familles différentes de dispositifs de protection.

La première famille comprendra les systèmes inspirés des dispositifs à fils pilotes, dans lesquels on se servira de la ligne pour transmettre, au moyen de courants de haute fréquence, des signaux destinés à verrouiller ou actionner des relais à distance.

Dans cette famille, les appareils essentiels qui vérifient l'état d'isolement de la ligne, seront alimentés, comme dans les dispositifs actuellement en usage, par les courants et les tensions *de travail* de la ligne, réduits ou transformés d'une manière quelconque; le contrôle de l'isolement de la ligne sera donc effectué à la fréquence du courant de travail, et les courants porteurs ne serviront que d'instruments de liaison. Nous appellerons les systèmes appartenant à cette famille « *dispositifs différentiels à liaisons par courants porteurs* ».

La seconde famille comprendra les systèmes où le contrôle de l'isolement de la ligne sera effectué par le courant de haute fréquence lui-même, et nous les appellerons « *dispositifs à ondes de contrôle* ».

II. — *Dispositifs différentiels à liaisons par courants porteurs.*

Ces dispositifs, avons-nous dit, sont directement inspirés des dispositifs à fils pilotes; ils consistent donc à comparer continuellement, à l'origine A d'une ligne, d'une part les indications d'un appareil de mesure situé en A et d'autre part, celles d'un appareil similaire situé à l'extrémité opposée B et transmises par courants porteurs de B

vers A. Identiquement, on peut à l'extrémité B comparer les indications des appareils de mesure similaires situés en A et B, les indications de l'appareil de A étant transmises à B par courants porteurs.

Dès que les mesures effectuées en A et B accusent une divergence due à un état d'isolement défectueux de la ligne, des relais faciles à imaginer provoquent l'ouverture des interrupteurs en A et B simultanément.

On a proposé différents dispositifs directement inspirés du système Merz-Price et qui consistent, par exemple (1), à engendrer aux deux extrémités de la ligne des courants de haute fréquence de même phase et d'amplitudes proportionnelles au courant de travail de la ligne ; ces courants de haute fréquence sont injectés dans la ligne de telle sorte que la somme des courants issus de A et de celui de B soit nulle, tant que les courants primaires sont égaux et de même phase aux deux extrémités du feeder. Ce procédé revient au système Merz dans lequel on a converti le courant primaire en courant porteur, et où l'on utilise la ligne elle-même comme fil pilote. On a proposé de même (2) de modifier les fréquences produites par des postes émetteurs situés aux deux extrémités de la ligne en fonction des puissances ou des intensités qui traversent la ligne ; on dispose alors des relais actionnés par l'interférence (battements) des courants porteurs engendrés aux deux extrémités lorsque ces courants porteurs ont des fréquences différentes.

Partant de ce principe et en utilisant des appareils de mesure à distance plus ou moins perfectionnés, on peut évidemment imaginer un très grand nombre de dispositifs plus ou moins compliqués. Mais la simplicité étant un gage de sécurité, les meilleurs systèmes seront sans doute ceux où il faudra comparer entre les deux extrémités de la ligne, non pas la grandeur (scalaire ou vectorielle) d'une certaine quantité (intensité ou puissance), mais seulement sa direction (sens de circulation de l'énergie, ou, ce qui revient au même, phases relatives des courants).

Système Vedovelli. — Le premier dispositif proposé est très probablement celui de Vedovelli décrit dans un article paru en 1923 (3) et dans quelques brevets antérieurs. Sans insister sur les détails que l'on trouvera dans la publication précitée, nous rappellerons seulement que le système de Vedovelli consiste à asservir l'ouverture de chaque disjonc-

(1) Brevet français, n° 572 043.
(2) Brevet français, n° 582.305.
(3) E. Vedovelli, La Sélection, *R. G. E.*, 6 et 13 janvier 1923.

teur encadrant la ligne (fig. 2), au fonctionnement simultané de deux relais R_1 et R_2 accordés, l'un sur une fréquence f_1, l'autre sur une fréquence différente f_2. L'émission du courant de fréquence f_1 est provoquée à l'origine A par la fermeture d'un relais wattmétrique w_A, lorsque à cette station A l'énergie circule des barres vers la ligne; l'émission du courant de fréquence f_2 est déterminée à la station opposée B, par la fermeture des contacts d'un relais wattmétrique w_B, lorsque l'énergie circule des barres de la station B vers la ligne.

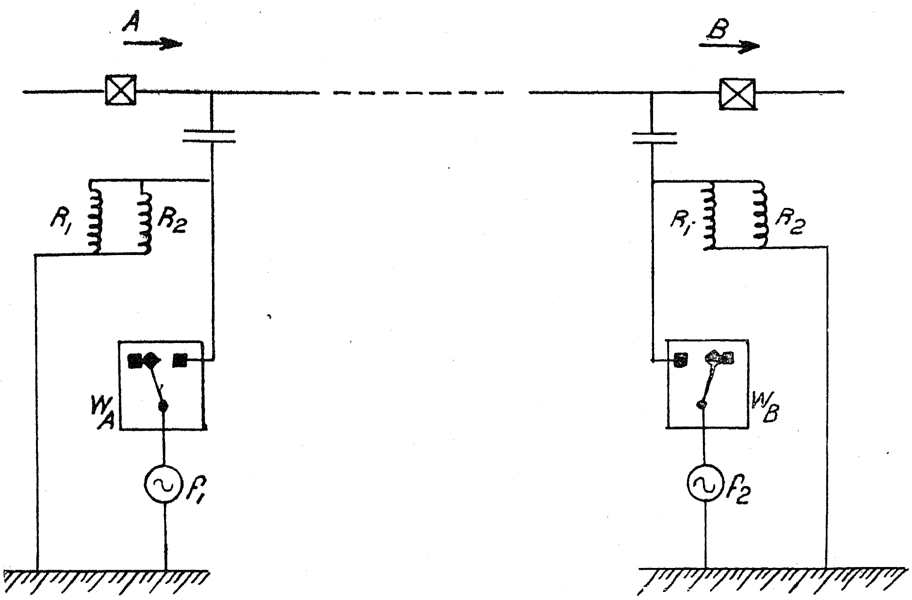


Fig. 2.

En cas de court-circuit sur la ligne *et si les stations A et B comportent des sources d'énergie*, les deux courants de fréquence f_1 et f_2 peuvent circuler et exciter simultanément aux stations A et B, les relais accordés R_1 et R_2, ce qui provoque le déclenchement des interrupteurs. Bien entendu, si l'une des sources d'énergie vient à manquer, le système est défaillant.

Système Fitzgerald (1). — Le dispositif Fitzgerald (G. E. C°) déjà utilisé sur certaines lignes aux Etats-Unis, consiste à comparer les phases respectives des courants aux deux extrémités de la ligne. Son principe est le suivant (fig. 3).

(1) *Journal of the, A. I. E. E.*, 1927, p. 1015.

A chacune des extrémités de la ligne, les circuits de déclenchement des disjoncteurs sont alimentés par l'intermédiaire des contacts :

1° d'un relais ampèremétrique RA.

2° d'un relais de verrouillage RV.

Les relais ampèremétriques sont alimentés à la manière ordinaire par les transformateurs d'intensité ; les relais de verrouillage ont leurs contacts normalement fermés et peuvent être excités par les récepteurs de haute fréquence R_1 et R_2. Chaque extrémité comporte un système transmetteur (T_1, T_2) et un système récepteur (R_1, R_2) d'ondes porteuses, qui sont accouplés à la ligne.

La tension plaque des lampes triodes des émetteurs et des récepteurs

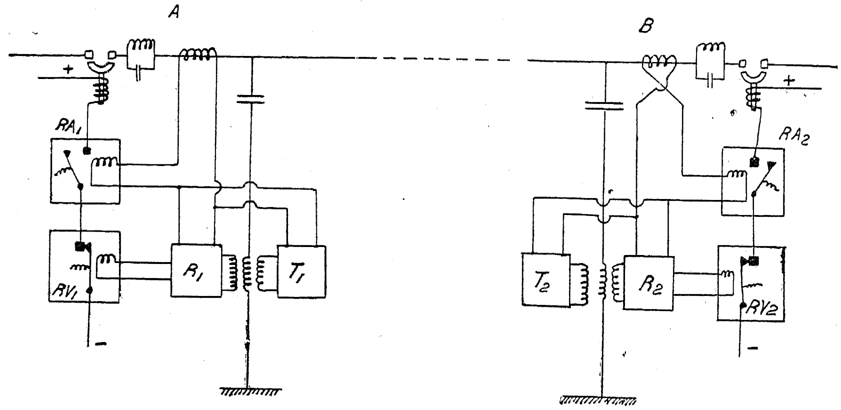


Fig. 3.

à haute fréquence est fournie directement par les transformateurs d'intensité ; elle est donc alternative, et de pulsation égale à la pulsation du courant de travail de la ligne ; mais les polarités des connexions sont inversées entre les émetteurs et les récepteurs de chaque poste, de telle sorte que la tension plaque de T_1 est positive, lorsque la tension plaque de R_1 est négative et vice-versa ; de même, la tension plaque de T_2 est positive lorsque la tension plaque de R_2 est négative et vice-versa. Enfin, les connexions des transformateurs d'intensité à la station B sont croisées par rapport à celles des transformateurs semblables de la station A, de telle sorte que si les courants de la ligne sont de même phase en A et en B, la tension plaque de l'émetteur T_2 est positive quand celle de l'émetteur T_1 est négative et vice-versa. On peut déjà remarquer que le récepteur R_1 n'est jamais impressionné par l'émetteur T_1, et que R_2 ne peut rien recevoir de T_2.

Le fonctionnement du dispositif est alors le suivant :

a) un court-circuit se produit à droite de B, au delà de la section protégée. Dans ce cas, les intensités dans la ligne en A et en B sont de même phase.

Les relais ampèremétriques RA_1 et RA_2 tendent à fermer leurs contacts sous l'action de la surintensité. Mais, les courants primaires étant de même phase en A et en B, les tensions plaques de T_2 et de R_1 sont simultanément positives ou négatives, ainsi que les tensions plaques de T_1 et de R_2 : le récepteur R_1 reçoit donc l'émission transmise par T_2, ce qui provoque l'ouverture du relais de verrouillage RV_1 ; de même R_2 reçoit l'émission de T_1 et ouvre le relais de verrouillage RV_2 : aucun des disjoncteurs ne peut s'ouvrir.

b) un court-circuit se produit entre A et B, sur la section protégée.

Dans ce cas, l'intensité dans la ligne en B est soit nulle, soit de phase opposée à celle qui circule en A. De toute manière, dans ce cas, R_1 ne peut recevoir de courant de haute fréquence, soit que l'émetteur T_2 soit muet (courant nul en B), soit que la tension plaque de T_2 soit de signe opposé à celui de T_1. Le circuit de déclenchement de l'interrupteur A se ferme donc en même temps que les contacts du relais ampèremétrique RA_1. De même, le récepteur R_2 reste inactif car, ou bien sa tension plaque est nulle (courant nul en B), ou bien elle est de signe contraire à celui de la tension plaque de T_1.

L'avantage incontestable de ce dispositif est de ne mettre en œuvre que des transformateurs d'intensité, et de permettre la comparaison des phases relatives de deux courants sans mesure de tension, et, par conséquent, sans qu'il soit nécessaire d'utiliser des réducteurs de potentiel. Il nécessite, par contre, de la part du matériel à haute fréquence, des caractéristiques particulières qui peuvent rendre plus délicats son réglage et sa mise au point.

III. — *Dispositif à relais wattmétriques de déséquilibre.*

Nous avons songé que l'on pourrait avantageusement allier aux qualités des systèmes différentiels à ondes porteuses, celles des dispositifs actuellement employés dans certaines protections différentielles des lignes en parallèle (protection D.T.F. par exemple) et qui proviennent de l'emploi de relais wattmétriques alimentés par le déséquilibre des puissances. Comme on l'a souligné maintes fois, l'emploi de relais wattmétriques de déséquilibre permet de prévoir des appareils qui, n'étant parcourus normalement par aucun courant, peuvent être rendus aussi sensibles que l'on veut à l'action des composantes du déséqui-

libre des tensions et du courant qui n'apparaissent que pendant la durée éphémère du court-circuit. Ces relais peuvent donc fonctionner quelle que soit la valeur des courants de défaut. D'autre part, les composantes qui agissent sur ces relais ont leurs valeurs maxima à l'endroit du défaut, condition particulièrement propice à leur bon fonctionnement et qui réhabilite l'usage des relais wattmétriques, auxquels on reprochait à juste titre de manquer de sensibilité aux environs d'un court-circuit, lorsqu'ils étaient montés pour mesurer la puissance totale dépensée. Enfin, une particularité essentielle des composantes inverse ou résiduelle des puissances, provient de ce qu'elles sont engendrées par le défaut lui-même, et semblent se diriger depuis le défaut

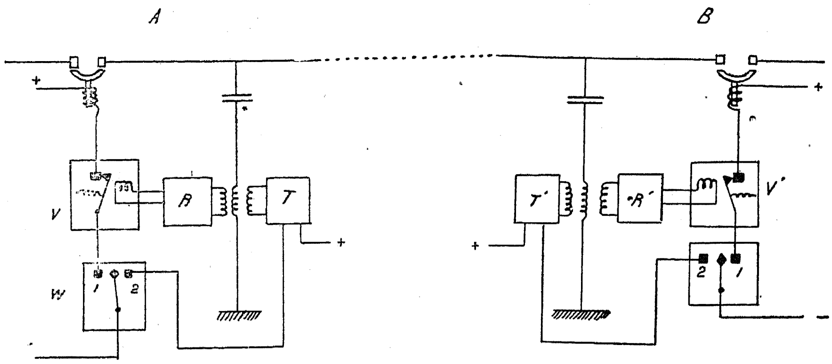


Fig. 4

vers tous les éléments équilibrés du réseau qu'ils soient générateurs ou récepteurs d'énergie.

Le schéma de la fig. 4 donne le principe de notre dispositif différentiel à ondes porteuses. A chacune des stations A et B, le circuit de disjonction de l'interrupteur comprend un relais wattmétrique de déséquilibre WW′ (actionné par la puissance inverse ou par la puissance résiduelle qui circule dans le feeder en cas de défaut asymétrique), et un relais de verrouillage VV′ dont les contacts sont normalement fermés. Chaque extrémité comporte aussi un transmetteur TT′ et un récepteur RR′ à haute fréquence, couplés avec la ligne de transport d'énergie. Chaque relais de verrouillage est excité par les courants issus du dispositif récepteur voisin : V par R et V′ par R′. Les relais wattmétriques portent deux contacts fixes 1 et 2. Lorsque le contact mobile vient contre le contact fixe 1, le circuit de déclenchement se trouve fermé ; mais lorsqu'il vient contre le contact fixe 2, c'est le circuit d'alimentation (tension plaque) du poste émetteur qui se trouve fermé. Les

enroulements de chacun des relais wattmétriques W et W′ sont branchés de telle sorte que les contacts mobiles viennent contre les contacts fixes 1, lorsque les composantes inverse ou résiduelle de la puissance circulent du feeder vers les barres de la station correspondante, et contre les contacts fixes 2 lorsque les composantes de la puissance circulent des barres de la sous-station vers le feeder.

Le fonctionnement de l'ensemble se comprend alors aisément :

a) en régime normal, lorsqu'il n'y a aucun défaut dans le réseau, les relais wattmétriques W et W′ sont au repos, les bobines de déclenchement ne sont pas alimentées, et l'émission de haute fréquence est arrêtée à chacun des postes ;

b) s'il se produit un défaut sur le feeder protégé entre les stations A et B, la composante symétrique inverse ou la composante résiduelle de la puissance circule du feeder vers les barres dans chaque sous-station. Les relais wattmétriques ferment alors leur contact mobile sur leur contact fixe 1, ce qui a pour effet d'exciter les bobines de déclenchement des disjoncteurs. Au cours de cette opération « positive », la haute fréquence reste encore arrêtée aux deux extrémités.

c) Supposons maintenant qu'un défaut se produise dans le réseau, mais au delà du feeder protégé, à droite de B par exemple. A la station A, la composante inverse ou la composante résiduelle de la puissance se dirige du feeder vers les barres, mais à la station B elle se dirige des barres vers le feeder ; le relais wattmétrique W′ amène donc son contact mobile contre le contact fixe 2 et provoque l'émission du transmetteur T′ ; cette émission provoque à son tour l'ouverture du relais V de la station A, et, accessoirement, celle du relais V′ de la station B ; aucun interrupteur ne peut s'ouvrir bien que le relais W de la station A ait fermé son contact mobile contre le contact fixe 1.

On notera que dans ce dispositif, les relais n'effectuent aucune « mesure » proprement dite, mais fonctionnent par « tout ou rien ». Aucune précision n'est donc nécessaire de la part des relais et des transformateurs de mesure ; dans les réseaux à très haute tension, on pourra donc alimenter les circuits d'excitation des relais par des « bushings » en ce qui concerne le courant, et par des bornes condensateurs en ce qui concerne la tension. Il faut évidemment utiliser des relais wattmétriques à action très rapide, et on assure au dispositif une sécurité de fonctionnement complète en temporisant très légèrement (un dixième de seconde par exemple) l'action de la bobine de déclenchement.

Un autre avantage du dispositif est de n'exiger le fonctionnement des postes à haute fréquence que pendant la durée d'un court-

circuit sur le réseau, en dehors du feeder protégé. Ces postes émetteurs et récepteurs sont identiques à ceux qui sont utilisés pour la téléphonie et par conséquent de fabrication courante ; toute une partie du matériel nécessaire à ces postes, condensateur de couplage, batterie d'alimentation, etc., peuvent servir simultanément aux postes de téléphonie et aux postes destinés à la protection. Les relais eux-mêmes ne nécessitent aucune caractéristique spéciale et peuvent être choisis parmi un matériel ayant déjà la sanction de la pratique. Enfin, il suffit d'une seule longueur d'onde pour les deux postes transmetteurs, ce qui simplifie l'équipement des circuits bouchons. Un dernier avantage à noter réside dans ce fait que la haute fréquence ne sert ici que d'élément de verrouillage et ne contribue pas directement au fonctionnement des dispositifs de déclenchements ; une défaillance éventuelle de la haute fréquence n'empêche donc pas l'ouverture des disjoncteurs, elle risque tout au plus de provoquer un déclenchement intempestif au moment d'un court-circuit dans le réseau.

IV. — *Dispositifs à ondes de contrôle.*

On a proposé depuis plus de 25 ans d'utiliser des courants porteurs pour contrôler l'état d'isolement d'une ligne et actionner directement les appareils de déclenchement (1).

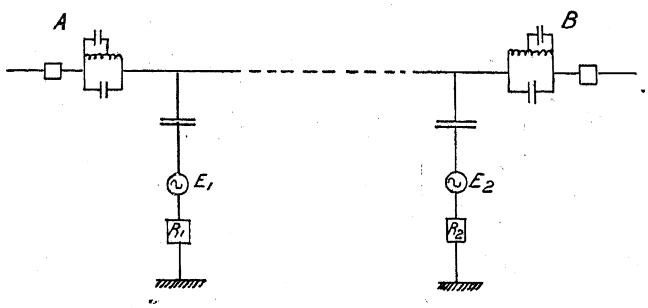


Fig. 5.

Sous une de leurs formes les plus élémentaires, ces dispositifs consistent à munir les deux extrémités d'une ligne AB (fig. 5) de circuits bouchons qui n'offrent qu'une impédance négligeable aux courants de travail de la ligne, mais qui isolent cette ligne de l'ensemble du réseau pour des courants d'une certaine fréquence.

(1) L'un des premiers brevets nous semble être celui de L. Neu (brevet français), n° 365.223 du 13 avril 1906).

A l'extrémité A de la ligne, on établit entre les conducteurs et le sol une source E_1 de tension alternative de fréquence f_1 et à l'extrémité opposée B, on dispose une source E_2 de fréquence f_2. Les bouchons situés en A et B sont accordés pour les fréquences f_1 et f_2.

Dans des conditions particulières (fréquences f_1 et f_2 suffisamment basses, ligne AB suffisamment courte), les courants fournis par les sources E_1 et E_2 se réduisent au courant de capacité de la ligne tant que

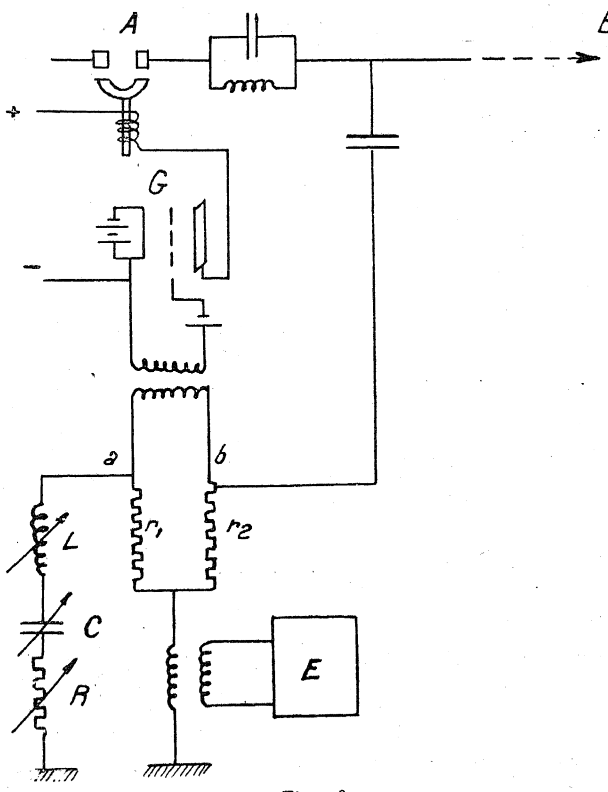


Fig. 6.

celle-ci est isolée du sol, mais peut prendre une amplitude suffisante pour actionner des relais accordés R_1R_2 lorsque la ligne se met à la terre.

On peut, d'une manière plus précise, mesurer à chaque instant aux postes A et B l'impédance apparente de la ligne à la fréquence des courants porteurs f_1 et f_2.

Le schéma de la fig. 6 indique un montage de ce genre : le poste émetteur d'ondes E émet des courants de haute fréquence d'une part dans la ligne à protéger A, B, et d'autre part dans un circuit local LCR constitué par une inductance, un condensateur et une résistance montés en série et réglés de telle sorte que l'impédance du circuit LCR,

soit égale à celle de la ligne AB tant que celle-ci est bien isolée. L'alimentation de la ligne et du circuit LCR s'effectue à travers des résistances égales r_1 et r_2 de telle sorte qu'en régime normal, la différence de potentiel entre les points a et b est nulle. Si la ligne est le siège du défaut d'isolement, son impédance apparente est modifiée, et il apparaît une différence de potentiel entre a et b ; cette différence de potentiel peut être décelée par un relais thermo ionique constitué par la lampe G, qui provoque le déclenchement du disjoncteur A.

Des dispositifs du type schématisé par la fig. 5, ont été récemment expérimentés aux Etats-Unis (1) sur une ligne de traction à 11 kV, en utilisant un courant de contrôle de l'ordre de 500 périodes par seconde.

Si séduisants que soient, à première vue, ces différents dispositifs, il ne faut pas se dissimuler que leur application pratique à la protection des longues lignes à très haute tension, offre des difficultés de réalisation très sérieuses. Lorsqu'il s'agit, en effet, de lignes à très haute tension, on est encore très limité, dans l'état actuel de la technique, par le dimensionnement des circuits de couplage et des circuits bouchons, ce qui oblige à utiliser des fréquences d'ondes porteuses relativement élevées, au moins égales à 20.000 p : s. par exemple. Or, pour des fréquences de cet ordre de grandeur et des lignes quelque peu longues, les phénomènes de propagation des courants le long des lignes présentent des particularités qui rendent leur application malaisée à la mesure de l'isolement de cette ligne.

Impédance apparente d'une ligne en haute fréquence. — Considérons, en effet, une ligne de longueur l, ouverte à ses extrémités, ou munie de circuits bouchons accordés pour la pulsation ω. Appliquons à l'origine de cette ligne, entre les conducteurs et le sol, une tension alternative de pulsation ω et d'amplitude U.

1° Si la ligne est à vide, c'est-à-dire isolée du sol tout le long de son parcours, le courant débité par la source est donné par la relation vectorielle

$$I_0 = \frac{U}{Z} \operatorname{Tgh} Kl,$$

Z étant l'impédance caractéristique de la ligne, et $K = \alpha + j\beta$ sa constante de propagation ; l'amplitude de ce courant est donc

$$|I_0| = \frac{U}{|Z|}\sqrt{\frac{\operatorname{Cosh} 2\alpha l - \cos 2\beta l}{\operatorname{Cosh} 2\alpha l + \cos 2\beta l}}$$

et son argument est $\psi - \theta$.

(1) L.-R. Ludwig, *Journal of the A.I.E.E.*, 1928, p. 401.

θ étant l'argument de l'impédance caractéristique Z

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\sin 2\beta l}{\operatorname{Sinh} 2\alpha l}.$$

2° Si la ligne est mise en court-circuit à une distance x de l'origine, le courant débité par la source devient

$$I_{cc} = \frac{U}{Z} \frac{1}{\operatorname{Tgh} Kx},$$

son amplitude est

$$| I_{cc} | = \frac{U}{| Z |} \sqrt{\frac{\operatorname{Cosh} 2\alpha x + \cos 2\beta x}{\operatorname{Cosh} 2\alpha x - \cos 2\beta x}},$$

et son argument est $\varphi - \theta$.

θ étant encore l'argument de l'impédance caractéristique Z et

$$\operatorname{tg} \varphi = - \frac{\sin 2\beta x}{\operatorname{Sinh} 2\alpha x}.$$

On peut, dès lors, remarquer que si un court-circuit se produit à une distance x de l'origine telle que

$$\frac{\cos 2\beta x}{\cos 2\beta l} = - \frac{\operatorname{Cosh} 2\alpha x}{\operatorname{Cosh} 2\alpha l},$$

l'amplitude du courant dans la ligne en court-circuit I_{cc} sera égale à celle du courant dans la ligne à vide I_0.

Si cette relation peut être satisfaite, la mesure de l'amplitude du courant ne pourra donc pas indiquer si l'isolement de la ligne est bon, ou si cette ligne n'est pas en court-circuit en l'un de ses points.

Mais il y a plus : *les phases* des courants à vide I_0 et en court-circuit I_{cc} seront les mêmes si le court-circuit se produit à une distance x telle que

$$\frac{\sin 2\beta x}{\sin 2\beta l} = - \frac{\operatorname{Sinh} 2\alpha x}{\operatorname{Sinh} 2\alpha l}.$$

Or, étant données les valeurs pratiques que l'on peut donner à α pour des lignes aériennes, et pour des distances x suffisamment voisines de l, ces deux égalités peuvent se trouver simultanément satisfaites assez approximativement pour des valeurs de x telles que

$$x = l - (n + 1) \frac{\lambda}{4},$$

λ étant la longueur d'onde du courant porteur.

Par conséquent, chaque fois qu'un court-circuit se produira à la distance x définie par la relation ci-dessus, la mesure de la grandeur ou de la phase de l'impédance apparente de la ligne ne pourra pas déceler la présence du court-circuit.

Ces points singuliers ne sont autres que les points nodaux de la tension le long de la ligne lorsque celle-ci est à vide.

La conséquence importante de ces considérations, c'est qu'une protection par onde de contrôle, basée sur la mesure de l'intensité ou de l'impédance, ne peut être envisagée qu'en utilisant une onde dont la longueur soit supérieure à 2 fois la longueur de la ligne à protéger. Pour une ligne aérienne de 50 kilomètres, cela conduit à utiliser une fréquence inférieure à 3 000 p : s ; pour une ligne de 150 km, il faudrait des courants de moins de 1 000 p : s.

Il s'ensuit que, dans l'état actuel de la construction des circuits bouchons et des appareils de couplage, de tels dispositifs ne peuvent être utilisés que pour la protection de lignes relativement courtes, ou fonctionnant à des tensions relativement basses.

Pour parer à cette difficulté, on a proposé récemment d'utiliser simultanément deux ondes de contrôle de longueurs différentes (1) ; les longueurs de chacune de ces ondes sont déterminées de telle sorte que leurs points nodaux ne coïncident pas le long de la ligne, afin qu'une mise en court-circuit en un point quelconque affecte au moins l'une des deux ondes au départ de la ligne. Une ligne équipée de la sorte nécessiterait 4 postes de longueurs d'ondes différentes (deux à chaque extrémité).

Mais nous avons récemment trouvé que l'on peut s'affranchir de toutes ces difficultés et aboutir à une solution particulièrement simple, en utilisant un seul poste émetteur à haute fréquence, branché à une des extrémités de la ligne, l'autre extrémité étant seulement équipée avec un système récepteur constitué par des impédances mortes. Le poste émetteur doit être polyphasé, et les relais de déclenchement placés, l'un du côté de l'émetteur, l'autre, du côté du récepteur, sont actionnés par le déséquilibre des courants de haute fréquence lorsque la ligne est affectée d'un court-circuit entre phases ou d'un défaut d'isolement. En choisissant judicieusement les impédances de l'émetteur et du récepteur, on peut faire en sorte que les relais se trouvent excités, quelle que soit la position du défaut. Mais la description de ce dispositif exige des développements préalables qui sortiraient du cadre de cette note : nous nous proposons d'y revenir en détail dans une prochaine publication.

(1) Brevet français, n° 680 245.

SUR L'ÉCHAUFFEMENT DES APPAREILS ÉLECTRIQUES ET SA MESURE RAPIDE [1]

par M. P. Bunet.

1° Il s'agit de prédéterminer l'échauffement limite d'un appareil sans attendre qu'il ait atteint sa température de régime. — 2° Formule; cas de pertes constantes; cas de pertes variables avec la température. — 3° Mesure anticipée de l'échauffement suivant la règle allemande; cas simplifié où les pertes sont constantes. — 4° Méthodes basées sur la loi exponentielle de l'échauffement : par les coefficients angulaires des tangentes en certains points; par le relevé des températures à intervalles de temps déterminés; comparaison des deux méthodes. — 5° Exemple numérique de résistances dans l'huile. — 6° Résultats obtenus dans la mesure des pertes de condensateurs dans l'huile. Influences par la courbe en V ces pertes dans l'huile. — 7° Des formules et des règles pratiques analogues s'appliquent-elles aux machines tournantes?

1. — L'échauffement des appareils électriques n'atteint ordinairement pas une valeur constante avant un temps assez long et la détermination de sa limite exacte exige un essai prolongé. On peut dire que bien souvent, on a tendance à arrêter trop tôt cet essai.

Le cas le plus simple est celui d'un appareil dont le régime électrique est fixe, donnant lieu à des pertes constantes p, ne variant pas avec la température, et qui se refroidit surtout par convection ou circulation d'air. L'échauffement étant θ sur l'air ambiant, si cet échauffement augmente de $d\theta$ dans le temps dt, on a

$$pdt = cd\theta + A\theta dt$$

où c est un produit complexe de masses et de chaleurs spécifiques et A un coefficient d'expulsion de chaleur qui est constant, au moins dans de certaines limites.

On peut écrire

$$p = c\frac{d\theta}{dt} + A\theta \qquad (1)$$

d'où

$$\theta = \frac{p}{A}\left(1 - e^{-\frac{A}{c}t}\right) \qquad (2)$$

et, quand le régime est atteint, l'échauffement est

(1) Cette communication, présentée à la séance du 28 mai 1931, sera discutée au cours de la Semaine de Discussions de novembre 1931.

$$\Theta = \frac{p}{A}. \tag{3}$$

Supposons que l'on connaisse c, et qu'on mesure à un instant quelconque, sans même repérer le temps depuis le début de l'expérience, la température θ et sa variation pendant une courte durée, au moyen d'appareils suffisamment précis; alors tout est connu dans l'équation (1) si l'on a aussi p; on en tire A, puis l'échauffement de régime par (3).

Théoriquement, l'observation du régime de température à un seul moment quelconque de l'essai donne la température finale, parce qu'une telle exponentielle est complètement déterminée par un point et la tangente en ce point.

Mais d'abord qu'est c? Si l'on décompose l'appareil en de ses constituants dont on évalue la masse et la chaleur spécifique, on s'aperçoit que l'on n'obtient pas des résultats exacts. Il faut tenir compte de corps voisins, ne serait-ce que le support de l'appareil en essai; une légère augmentation de la température ambiante de la salle et des corps voisins, due au fonctionnement même de l'appareil, peut agir aussi sur c comme sur A selon des lois bien difficiles à estimer.

Il vaut mieux faire plusieurs mesures, et en pratique c'est indispensable. On peut se limiter à deux, et avec deux équations (1), tirer A après élimination de c.

2. — En général les pertes ne sont pas constantes avec la température; elles sont de forme

$$p = p_0(1 + \alpha\theta + \beta\theta^2 + \cdots\cdots). \tag{4}$$

L'équation (1) est modifiée, et la courbe d'échauffement n'est plus une exponentielle pure. Cependant elle l'est encore dans le cas où p n'a qu'un terme correctif proportionnel à l'échauffement, soit

$$p = p_0(1 + \alpha\theta),$$

l'équation (1) se modifiant simplement en

$$p_0 = c\,\frac{d\theta}{dt} + (A - \alpha p_0)\theta = c\,\frac{d\theta}{dt} + B\theta. \tag{5}$$

De même, les courbes ne sont pas des exponentielles pures si A n'est pas une constante et qu'il prend la forme

$$A = A_0(1 + a\theta + b\theta^2 + \cdots\cdots). \tag{6}$$

Mais de toute façon, si p et A peuvent être représentés par des développements (4) et (6), il suffit de faire un certain nombre de mesures de t, θ et $\frac{d\theta}{dt}$ pour obtenir assez d'équations, ou mieux un excès d'équations et en tirer la température limite.

3. — Lorsque l'on a poussé assez loin l'essai d'échauffement d'un appareil donné, que l'on atteint par exemple vers 8 ou 9 dixièmes de l'échauffement de régime, on applique quelquefois une règle que rappelle le règlement allemand. Les températures étant en ordonnées et le temps en abscisses, on porte à gauche de l'axe des températures et perpendiculairement les valeurs de $\frac{d\theta}{dt} = \operatorname{tg} \varphi$. On trace cette courbe et on la prolonge jusqu'à la rencontre de l'axe des températures. On obtient ainsi l'échauffement limite. On a coutume de ne procéder à cette opération que vers la fin de l'essai; la courbe de $\operatorname{tg}\varphi$ en fonction de θ est une petite ligne droite ou supposée telle.

Mais remarquons que si les pertes sont constantes, ou de forme $p_0(1 + \alpha\theta)$, et si A est constant, ce sont les équations (1) ou (5) qui représentent l'échauffement ; la courbe de $\operatorname{tg}\varphi$ en fonction de θ est une ligne droite depuis le début :

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{A}{c}(\Theta - \theta) \qquad \text{d'après (1)}$$

ou

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{A - p_0\alpha}{c}(\Theta - \theta). \qquad \text{d'après (5)}$$

On obtient alors l'échauffement limite dès la première partie de la courbe, en réduisant l'essai à une courte durée.

4. — Un certain nombre de méthodes basées sur la montée exponentielle de la température ont été déjà décrites. On trouve leur liste dans l'ouvrage de M. C. Guilbert (Essais de machines électriques, pages 197 et suivantes). Appliqués sans précautions, ces procédés ne donnent pas satisfaction ; certains sont basés sur le tracé de la tangente à l'origine, et alors il faut bien tenir compte de petites différences de températures initiales entre l'appareil et l'air ambiant dont l'influence disparaît au bout d'un certain temps de marche.

Comme le dit M. Guilbert, toutes ces méthodes peuvent se classer en deux catégories : celles qui utilisent les coefficients angulaires des tangentes en certains points, et celles qui font intervenir les températures à des intervalles de temps déterminés.

On trouve souvent émise cette opinion que la première série de méthodes est sensiblement moins précise que la seconde. Nous ne partageons pas cette opinion. Il est bien évident que si l'on dessine, sur une courbe plus ou moins bien tracée, les tangentes en divers points, divers opérateurs trouveront parfois des droites assez différentes. Mais on arrive à beaucoup plus de précision si, partant d'une courbe expéri-

mentale, on détermine pour de nombreux points $\frac{\Delta y}{\Delta x}$, puisque l'on trace la courbe dérivée en passant au mieux et régulièrement par les points de cette seconde courbe ainsi obtenus. Dans le cas particulier, on obtient les valeurs de $\frac{d\theta}{dt} = \text{tg}\,\varphi$ à quelques centièmes près bien souvent. Ceci fait, *en considérant une montée de température exponentielle*, pour deux points θ_1 et θ_2, on a les $\frac{d\theta}{dt}$ de valeurs $\text{tg}\,\varphi_1$ et $\text{tg}\,\varphi_2$. d'où l'on obtient la température de régime indéfini par :

$$\Theta = \frac{\theta_2\,\text{tg}\,\varphi_1 - \theta_1\,\text{tg}\,\varphi_2}{\text{tg}\,\varphi_1 - \text{tg}\,\varphi_2} = \frac{\theta_2\,\text{tg}\,\varphi_1 - \theta_1\,\text{tg}\,\varphi_2}{\Delta\,\text{tg}\,\varphi}.$$

Pour nous rendre compte de la précision de détermination de Θ et de combien elle est affectée par les erreurs sur les dérivées $\text{tg}\,\varphi$, dérivons Θ en fonction de $\text{tg}\,\varphi$ moyen.

On a
$$d\Theta = \frac{\Delta\theta\,.\,\text{tg}\,\varphi}{(\Delta\,\text{tg}\,\varphi^2)}\,d\,\text{tg}\,\varphi.$$

Par exemple, $\Delta\theta = 5$ deg., $\text{tg}\,\varphi = 0{,}6$, $\Delta\,\text{tg}\,\varphi = 0{,}2$; $d\,\text{tg}\,\varphi = 0.03\,\text{tg}\,\varphi$ est l'erreur sur $\text{tg}\,\varphi$; celle sur Θ ou $d\Theta = 1{,}3$ degré.

Il faut ajouter les erreurs possibles sur chacune des deux tangentes, puis celles sur $\Delta\theta$, et finalement on aurait Θ à peu de degrés près. Quelques déterminations amèneraient à une bonne moyenne.

Les procédés de la deuxième catégorie, basés sur l'observation de températures, dérivent des relevés aux temps $t_1 t_2 t_3$, généralement t, $t + \Delta t$, $t + 2\Delta t$, avec des échauffements $\theta_1\theta_2\theta_3$. *En considérant une montée de température exponentielle*, on a

$$\Theta = \frac{\theta_2^2 - \theta_1\theta_3}{2\theta_2 - (\theta_1 + \theta_3)}.$$

Si l'on agit sans précautions on peut avoir de fortes erreurs.

Chaque indécision, comme $d\theta_1$ en apportera une autre $d\Theta$ sur Θ,

$$d\Theta = \frac{1}{\left[\left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta_3 - \theta_2}\right) - 1\right]^2}\,d\theta_1$$

La fraction du dénominateur est assez voisine de 1, sauf si θ_3 et θ_2 sont fort différents, c'est-à-dire si l'on exécute un essai très prolongé ; elle est $1 + \varepsilon$, et on a

$$d\Theta = \frac{d\theta}{\varepsilon^2}.$$

Si par exemple $\varepsilon = 0{,}1$, l'erreur possible sur Θ due à chaque lecture θ est 100 fois l'erreur sur cette dernière.

Ainsi, dans un essai effectué au bout de 3, 4 et 5 heures, un observateur a trouvé pour échauffements

11,5 14,5 17 degrés,

tandis que le second a lu

11,5 14,4 17,1 degrés.

Le premier, avec la formule ci-dessus, arrive à 29,5 degrés pour l'échauffement final ; le second aurait 53,5.

En prolongeant plus longtemps, soit 3, 4 1/2 et 6 heures, les lectures

11,5 15,7 19,4 degrés,

ou 11,4 15,8 19,3 degrés,

donnent 46,8 ou 32,9 degrés pour l'échauffement final.

On peut faire mieux avec plus de soin, mais on voit bien que le procédé des tangentes n'est pas systématiquement à rejeter pour adopter l'autre.

5. — Appliquons à un exemple. Répartissons dans une caisse remplie d'huile des résistances d'un alliage sans coefficient de température dissipant 270 watts à une tension normale. La température était relevée au moyen de thermomètres placés sur la paroi extérieure. Limitons la durée de l'essai entre 6 et 7 heures ; cela permet d'observer des échauffements de 15 et 20 degrés, avec des dérivées égales à $0{,}732.10^{-3}$ et $0{,}555\ 10^{-3}$ (fig. 1, courbe supérieure).

Nous aurons les deux équations :

$$270 = 0{,}732.10^{-3}c + 15A$$
$$270 = 0{,}555.10^{-3}c + 20A.$$

De là $A = 7{,}56$ et $c = 214.10^3$ et l'échauffement au bout d'une durée indéfinie $\Theta = 35{,}6$ degrés.

Si nous portons à gauche les valeurs de $\operatorname{tg} \varphi$ et que nous les réunissions par une droite, nous arrivons à cette même valeur. Nous verrions aussi que, en partant de températures autres que 20 et 15 degrés, nous trouverions à peu près la même chose.

En prolongeant l'essai un peu au delà de 10 heures, on voit mieux que cette asymptote est très acceptable.

Pour 25 degrés d'échauffement $\operatorname{tg} \varphi = 0{,}375$, et en combinant avec les chiffres précédents, on aurait

$$\Theta = 35{,}5 \quad \text{ou} \quad 35{,}4.$$

Nous trouvons $c = 214\,000$ joules par degré, ce qui correspond à

51 calories par degré : c'est la masse réduite en eau, en kilogrammes. En évaluant simplement les masses de métaux et d'huile contenues, et en appliquant au mieux des chaleurs spécifiques tirées de tables, on ne trouve guère au-dessus de 0,6 fois cette valeur, avec une médiocre précision, il est vrai. Si l'on partait de $c = 140\,000$ et $\theta = 20$ degrés, on obtiendrait $\Theta = 28$ degrés manifestement inexact.

6. — Ces essais avaient été entrepris dans le but de mesurer les pertes et l'échauffement de condensateurs placés dans des boîtes identiques, contenant aussi de l'huile et essayées en même temps. La courbe inférieure de la figure donne les résultats obtenus. On détermine ainsi les pertes, en se passant de wattmètres. La fréquence était 1 000 p:s, ce qui rendait la mesure directe de l'angle de pertes assez difficiles.

Prenons les échauffements et leurs variations au bout des mêmes temps approximatifs que pour les résistances; ils sont seulement 10 et 15 degrés. Appelons X les pertes des condensateurs ; les équations sont

$$X = 0{,}772.10^{-3}c + 10A$$
$$X = 0{,}567.10^{-3}c + 15A,$$

d'où, en gardant $A = 7{,}56$ déterminé au moyen des résistances $\Theta = 28{,}8$ degrés et $X = 218$ watts,

En prolongeant suffisamment l'essai, on voit que cette valeur est un peu forte pour l'asymptote. D'ailleurs, les autres valeurs de tg φ s'éloignent de la ligne droite déterminée par les points de 10 et 15 degrés. L'échauffement limite paraît être vers 24 degrés.

L'accord qui se manifestait dans le cas de la résistance a maintenant cessé.

On pourrait chercher une explication dans le manque de fluidité de l'huile froide, qui ne circulerait pas bien entre les éléments des condensateurs ; avec la montée de température, la fluidité apparaît et cela augmenterait le facteur A, qui caractérise l'élimination de chaleur.

Cette cause peut exister réellement, mais, à notre avis, c'est surtout la valeur des pertes, diminuant très rapidement à partir d'une certaine température, qui réduit l'échauffement de régime. Les condensateurs contenant certaines huiles sont caractérisés par une variation considérable des pertes avec la température, qui commence par une diminution jusqu'à un minimum à une température souvent voisine de 60 degrés.

Une huile analogue, essayée à la fréquence 50 p:s a indiqué des angles de pertes tels que tg $\alpha = 0{,}0044$ à 30 degrés, 0,0039 à 40 degrés, avec 0,0031 pour minimum.

Les pertes ne peuvent plus être représentées par une fonction linéaire dans un intervalle de températures de quelques dizaines de degrés. Les lois de l'exponentielle ne s'appliquent donc pas.

Les condensateurs ci-dessus ayant une puissance réactive de 42 kVA, la perte entre 10 et 15 degrés d'échauffement, soit vers 25 degrés de température, étant 218 watts, on a $\operatorname{tg} \alpha = 0{,}0052$ pour la fréquence 1 000 p:s.

A titre d'indication approximative, si nous admettons la proportionnalité des pertes aux échauffements limites probables, nous aurions $270 \frac{24}{35{,}6} = 182$ watts vers 40 degrés, ou $\operatorname{tg} \alpha = 0{,}0043$, ce qui reste dans les mêmes rapports qu'à 50 p:s.

7. — Les considérations qui précèdent ont surtout pour but d'obtenir l'avis de nos collègues sur ces procédés qui nous paraissent intéressants. Avec des essais exécutés sans recherche de précision, par des opérateurs non choisis, nous voyons que nous pouvons tirer des vérifications ou conclusions utiles.

Les machines tournantes peuvent-elles donner lieu à des formules de règles d'essais pratiques de cette nature? Certains le pensent, et nous venons justement d'avoir connaissance de recherches fort ingénieuses sur ce sujet, dues à notre collègue M. Rougé ; nous espérons qu'il en fera quelque jour part à notre Société.

PHASEMÈTRE A FER TOURNANT POUR CIRCUITS TRIPHASÉS NON ÉQUILIBRÉS, ÉCHELLE 360° (1)

par A. Iliovici,

Ingénieur Conseil de la Compagnie pour la Fabrication des Compteurs.

Définition du facteur de puissance dans un circuit triphasé non équilibré. — Relation entre le facteur de puissance et les composantes symétriques des courants et des tensions. - Examen critique des principaux phasemètres. — Emploi des phasemètres à un seul circuit de courant dans un circuit triphasé non équilibré. — Description du phasemètre à fer tournant pour circuits non équilibrés, de la Compagnie pour la fabrication des Compteurs. — Théorie du phasemètre à fer tournant pour circuits non équilibrés : 1° les tensions qui alimentent le phasemètre sont équilibrées, les courants étant quelconques; 2° les tensions et les courants sont équilibrés.

1. — *Définition du facteur de puissance dans un circuit triphasé non équilibré.* — Le facteur de puissance k, dans un circuit monophasé, est défini par la formule :

$$k = \frac{P}{P_{app}}, \tag{1}$$

P étant la puissance (active) mise en jeu dans le circuit, P_{app} sa puissance apparente définie par :

$$P_{app} = U.I, \tag{2}$$

U et I étant les valeurs efficaces de la tension et du courant.

Si la tension et le courant sont sinusoïdaux, on a :

$$k = \cos \varphi, \tag{1'}$$

φ étant le déphasage entre le courant et la tension. Suivant l'habitude, nous désignerons, dans tous les cas, le facteur de puissance par cos φ.

Dans un circuit triphasé ayant ses tensions et courants équilibrés, on peut encore appliquer la formule (1), P et P_{app} étant la puissance

---

(1) Cette communication, présentée à la séance de la 6e Section du 28 mai 1931 sera discutée à la Semaine de novembre 1931.

active et la puissance apparente de l'une des phases, de même que l'angle φ, donné par la formule (1') représente le déphasage entre le courant et la tension de l'une des phases, ou encore entre le courant dans un fil et la tension simple correspondante obtenue en créant un point neutre artificiel à l'aide de trois impédances égales.

Dans les circuits triphasés non équilibrés, la définition du facteur de puissance devient plus difficile, au moins dans le cas le plus général.

Pourtant, si on admet que les tensions et les courants sont sinusoïdaux, on peut conserver la formule (1) en posant

$$P_{app} = \sqrt{P^2 + P_r^2}, \quad (3)$$

P_r étant la puissance réactive du circuit. On aura donc, dans ce cas :

$$\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + P_r^2}}, \quad (4)$$

les tensions et les courants étant équilibrés ou non équilibrés (1).

2. — *Relation entre le facteur de puissance cos φ et les composantes symétriques des courants et des tensions.* — Le facteur de puissance donné par la formule (4) peut être exprimé en fonction des degrés de déséquilibrage des tensions (ε_u) et des courants (ε_i), et des déphasages entre les composantes symétriques.

Si, pour simplifier, nous nous limitons au cas où la composante résiduelle des tensions ou des courants est nulle, nous avons les relations connues :

$$(5) \quad P = 3[P_d + P_i] \qquad \text{et} \qquad (6) \quad P_r = 3(P_{rd} + P_{id}),$$

avec :

$$(7) \quad P_d = U_d I_d \cos\varphi_d, \qquad (7') \quad P_i = U_i I_i \cos\varphi_i,$$

$$(7'') \quad P_{rd} = U_d I_d \sin\varphi_d \qquad \text{et} \qquad (7''') \quad P_{ri} = U_i I_i \sin\varphi_i.$$

Dans ces formules : P_d et P_i sont les composantes, directe et inverse, de la puissance active, P_{rd} et P_{ri} les mêmes composantes pour la puissance réactive, U_d et U_i les composantes directe et inverse des tensions, I_d et I_i celles des courants, φ_d le déphasage entre I_d et U_d, φ_i le déphasage entre U_i et I_i.

En remplaçant dans la formule (4) on trouve, après simplifica-

(1) Ces considérations sont valables aussi lorsque les tensions seules sont sinusoïdales, les courants pouvant être de forme quelconque, ou inversement. La définition donnée par la formule (4) a été adoptée par la Commission Electrotechnique Internationale à la réunion de Stockholm, en juin 1930.

tions :

$$\cos\varphi = \frac{U_d I_d \cos\varphi_d + U_i I_i \cos\varphi_i}{\sqrt{U_d^2 I_d^2 + U_i^2 I_i^2 + 2U_d I_d U_i I_i \cos(\varphi_d - \varphi_i)}},$$

ou, en divisant le numérateur et le dénominateur par $U_d . I_d$ et en posant :

$$\varepsilon_u = \frac{U_i}{U_d} \qquad \text{et} \qquad \varepsilon_i = \frac{I_i}{I_d},$$

on trouve :

$$(8) \qquad \cos\varphi = \frac{\cos\varphi_d + \varepsilon_u . \varepsilon_i . \cos\varphi_i}{\sqrt{1 + \varepsilon_u^2 \varepsilon_i^2 + 2\varepsilon_u \varepsilon_i \cos(\varphi_d - \varphi_i)}},$$

[ε_u et ε_i sont respectivement le degré de déséquilibrage des tensions et des courants du circuit].

On voit facilement que, si : $\varepsilon_u = 0$ (tensions équilibrées), ou : $\varepsilon_i = 0$ (courants équilibrés) ou encore : $\cos\varphi_i = \cos\varphi_d$ (le circuit présente le même déphasage entre les composantes directes et entre les composantes inverses des courants par rapport aux tensions) on a :

$$(9) \qquad \cos\varphi = \cos\varphi_d.$$

Donc, dans beaucoup de cas, le $\cos\varphi$ du circuit se confond avec le $\cos\varphi_d$, correspondant aux composantes directes des courants et des tensions.

Certains ingénieurs considèrent qu'il faut définir le facteur de puissance par : $\cos\varphi = \cos\varphi_d$, de préférence à la formule (4).

Nous allons montrer que, vu les déséquilibrages que l'on rencontre pratiquement, la valeur relative de la différence entre $\cos\varphi$ défini par la formule (4) et $\cos\varphi_d$, est négligeable. — Ceci résulte de la formule (8) en tenant compte de ce que ε_u et ε_i sont assez petits pour que l'on puisse négliger $\varepsilon_u^2 . \varepsilon_i^2$ devant l'unité. On trouve, avec cette approximation,

$$(10) \qquad \frac{\cos\varphi - \cos\varphi_d}{\cos\varphi_d} = \varepsilon_u \varepsilon_i \operatorname{tang}\varphi_d . \sin(\varphi_d + \varphi_i)$$

ou, en valeur absolue :

$$(10') \qquad \left|\frac{\cos\varphi - \cos\varphi_d}{\cos\varphi_d}\right| \leqslant |\varepsilon_u . \varepsilon_i \operatorname{tang}\varphi_d| .$$

On voit, d'après cette formule, que la valeur relative de la différence entre $\cos\varphi$ et $\cos\varphi_d$ est, pour ε_u et ε_i donnés, d'autant plus grande que $\cos\varphi$ est plus petit. Seulement, on peut remarquer que, dans la pratique, les faibles $\cos\varphi$ correspondent habituellement aux

circuits comportant beaucoup de moteurs d'induction, donc à des circuits de faible déséquilibrage.

Prenons : $\varepsilon_u = 0{,}025$ (1) et $\varepsilon_i = 0{,}2$ (2) on trouve :
pour $\cos \varphi = 0{,}8$:

$$\left|\frac{\cos \varphi - \cos \varphi_d}{\cos \varphi_d}\right| \leqslant 0{,}025 \times 0{,}2 \times 0{,}75$$

ou

$$\left|\frac{\cos \varphi - \cos \varphi_d}{\cos \varphi_d}\right| \leqslant 0{,}004$$

et pour $\cos \varphi = 0{,}4$:

$$\left|\frac{\cos \varphi - \cos \varphi_d}{\cos \varphi_d}\right| \leqslant 0{,}025 \times 0{,}2 \times 2{,}3$$

ou

$$\left|\frac{\cos \varphi - \cos \varphi_d}{\cos \varphi_d}\right| \leqslant 0{,}01.$$

Ces différences sont inférieures aux erreurs des meilleurs phasemètres.

On peut donc, pratiquement, définir le facteur de puissance, soit par :

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + P_r^2}}$$

soit par $\cos \varphi = \cos \varphi_d$.

3. — *Examen critique des principaux phasemètres.* — Les phasemètres les plus répandus sont du type électrodynamique : l'équipage mobile est formé de deux cadres solidaires formant entre eux un angle approprié (le plus souvent voisin de 90°) et se déplaçant dans le champ d'une bobine fixe.

Dans les phasemètres pour circuits triphasés, la bobine fixe est habituellement parcourue par le courant de l'un des fils de ligne, tandis que les cadres mobiles sont alimentés par les deux tensions composées comprises entre ce fil et chacun des deux autres

Dans les phasemètres de la Compagnie pour la fabrication des Compteurs, les cadres sont alimentés par deux tensions diphasées obtenues en transformant les tensions triphasées à l'aide d'un système Scott. Les cadres, électriquement identiques, sont ainsi parcourus par des

(1) On trouve, par exemple : $\varepsilon_u = 0{,}025$, lorsque les tensions ont les valeurs : 110, 105 et 105 V.

(2) On trouve, par exemple : $\varepsilon_i = 0{,}2$, lorsque les trois courants ont les valeurs : 100, 76 et 76 A.

courants en quadrature et on a, entre autres, l'avantage d'obtenir, pour le phasemètre triphasé, la même échelle que pour les phasemètres diphasés et monophasés.

Pour amener les courants aux cadres, on emploie des fils en argent recuit, longs et fins, donnant de très faibles couples de torsion. Ces couples sont négligeables lorsque le phasemètre est parcouru par le courant nominal et soumis aux tensions nominales ; mais ils faussent les mesures pour les courants faibles, et limitent ainsi les conditions d'emploi de l'appareil.

Ainsi, il est difficile de construire des appareils suffisamment exacts pour des courants inférieurs au tiers ou au cinquième du courant nominal; de même, il est difficile de construire des phasemètres électrodynamiques à échelle très développée, et en particulier à échelle de 360°.

Pour éviter l'emploi de fils d'amenée du courant, on a imaginé plusieurs solutions dont les principales sont :

1° A la place des bobines mobiles, on emploie des fers mobiles aimantés par des bobines fixes. Cette solution a été adoptée, pour la première fois, à notre connaissance, par la Société Westinghouse. C'est aussi celle employée dans le phasemètre que nous allons étudier d'une façon particulière ;

2° On n'emploie qu'une seule bobine mobile parcourue par le courant secondaire d'un transformateur dont le primaire est intercalé dans l'un des fils de ligne. Le secondaire du transformateur est porté par l'équipage mobile.

Ce dispositif, réalisé pratiquement par la Maison Hartmann et Braun a, suivant notre avis, l'inconvénient de donner un équipage mobile trop lourd.

Un dispositif analogue, avec deux bobines mobiles, a été réalisé par la Société Nalder Bros et Thomson (London) [Phasemètre Gifford].

4. — *Emploi des phasemètres à un seul circuit de courant dans un circuit triphasé non équilibré.* — Si on suppose les tensions équilibrées, ce qui est suffisamment exact dans la pratique, un phasemètre à un seul circuit de courant donne le cos φ_1 entre le courant I_1 qui parcourt ce circuit et la tension qui lui correspond

Si les courants sont aussi équilibrés, on mesure le cos φ du circuit triphasé ; mais, pour les déséquilibrages des courants que l'on peut rencontrer dans la pratique, la différence relative entre le cos φ mesuré par l'appareil et le cos φ_d, qui représente le facteur de puis-

sance du circuit, dépasse, de beaucoup, dans certaines conditions, les valeurs pratiquement admissibles.

On peut démontrer (1) la relation :

$$(11) \qquad \left| \frac{\cos \varphi_1 - \cos \varphi_d}{\cos \varphi_d} \right| \leqslant \varepsilon_i \operatorname{tang} \varphi_d.$$

Si on suppose $\varepsilon_i = 0{,}2$, comme plus haut, on a : pour $\cos \varphi_d = 0{,}8$,

$$\left| \frac{\cos \varphi_1 - \cos \varphi_d}{\cos \varphi_d} \right| \leqslant 0{,}15$$

et pour $\cos \varphi_d = 0{,}4$,

$$\left| \frac{\cos \varphi_1 - \cos \varphi_d}{\cos \varphi_d} \right| \leqslant 0{,}45.$$

Ces erreurs sont de beaucoup supérieures aux erreurs admissibles qui sont de l'ordre de : *0,03*. On a proposé plusieurs solutions pour rendre les phasemètres exacts en circuits non équilibrés.

Nous citerons le phasemètre que M. GENKIN a décrit dans le travail cité en note et qui est basé sur le « filtrage » des composantes symétriques des courants, et celui que nous avons décrit dans le *Bulletin de la Société Française des Electriciens*, mars 1927, page 348 et qui est basé sur la mesure de la puissance active et de la puissance réactive.

Un appareil analogue à ce dernier a été imaginé par KAFKA (2) ; des appareils, basés sur le filtrage des composantes symétriques ont été imaginés surtout par des ingénieurs américains, PIERCE, EVANS, etc... Enfin, des appareils à fers mobiles ont été imaginés par LIPMANN et construits par NALDER BROS. Ces appareils sont, en général, beaucoup plus compliqués ou d'un réglage plus difficile que celui que nous allons décrire.

5. — *Description du phasemètre à fer tournant pour circuits non équilibrés, de la Compagnie pour la Fabrication des Compteurs.* — L'équipage mobile de ce phasemètre porte deux fers mobiles en forme de Z : A_1 et A_2 (fig. 1) ayant les axes de symétrie de leurs palettes à 90°. Ces fers sont soumis à l'action de deux bobines fixes B_1 et B_2, dont les axes sont confondus avec l'axe de rotation de l'équipage.

Celui-ci porte aussi l'aiguille indicatrice et un disque en alumi-

(1) Voir GENKIN, Mesure du facteur de puissance d'un circuit triphasé non équilibré (*Bulletin de la Société Française des Electriciens*, octobre 1926, p. 1158).

(2) Voir : Ein neuer Liestungsfaktormesser für Drehstrom mit ungleicher Belastung, *E. T. Z.*, 1924, p. 1429.

nium (qui n'est pas marqué sur la figure) se déplaçant dans les entrefers d'aimants, qui sert à l'amortissement des oscillations.

Les bobines B_1 et B_2 sont alimentées par deux tensions diphasées obtenues par transformation du système de tension triphasées du circuit dont on mesure le cos φ.

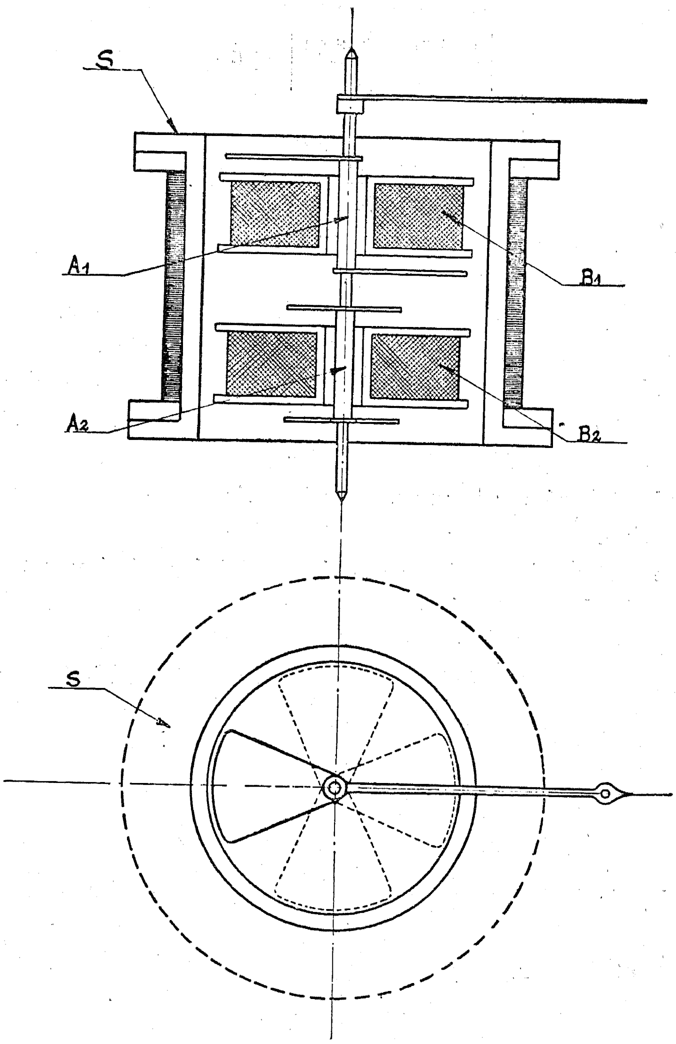


Fig. 1. — Phasemètre à fers tournants, échelle 360°, pour circuits triphasés non équilibrés. — Section suivant l'axe et vue en plan schématique.

Pour cela, les bobines B_1 et B_2 sont montées en série avec deux résistances égales R_2 et R_3 et connectées à deux bornes U_2 et U_3 (voir fig. 2) du phasemètre ; d'autre part, le point X commun aux deux bobines mobiles est connecté à une réactance B en série avec

une résistance R_1 aboutissant à la borne U_1 du phasemètre. Le circuit (B, R_1) a la même constante de temps que les circuits (B_1, R_2) et (B_2, R_3), ces derniers étant identiques. Les résistances R_1, R_2 et R_3 sont choisies de façon que les tensions aux bornes (XY) et (XZ) (fig. 2)

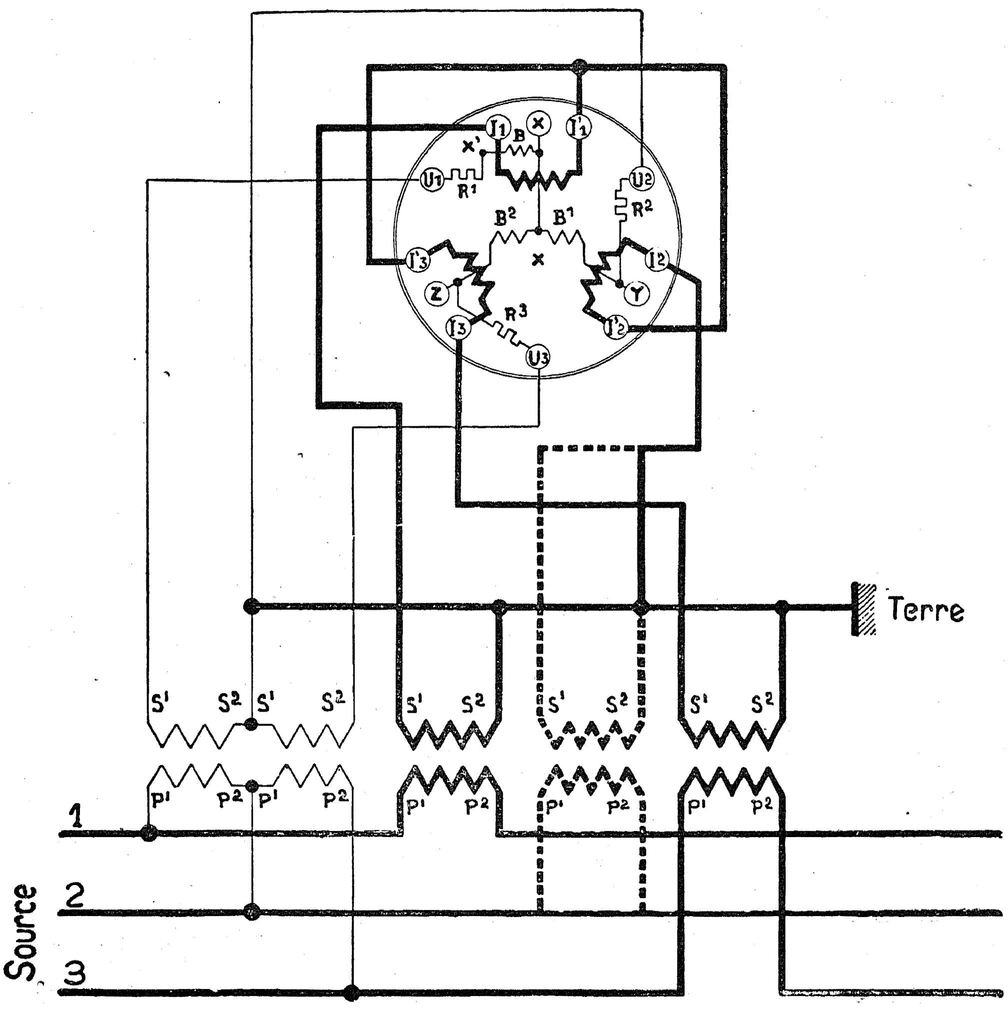


Fig 2. — Branchement du phasemètre pour circuits triphasés, avec 2 transformateurs de tension et 2 (ou 3) transformateurs de courant.

forment un système diphasé équilibré, lorsque les tensions entre les bornes U_1, U_2 et U_3 forment un système triphasé équilibré. Les trois résistances R_1, R_2, R_3 et la bobine B sont enfermées dans une boîte additionnelle ronde et plate, fixée à l'arrière de l'appareil, sur les bornes X, Y, Z. Les bornes U_1, U_2 et U_3 sont connectées à trois points

du circuit triphasé, ou aux bornes des secondaires de transformateurs de tension.

Les fers mobiles A_1 et A_2, aimantés par les bobines B_1 et B_2, sont soumis à l'action d'un champ magnétique *unique* produit par un « stator » S (fig. 1), entouré d'un anneau de fer, et bobiné d'une façon analogue au stator d'un moteur triphasé. Dans la figure 2, les trois phases du stator sont représentées en (I_1I_1), (I_2I_2) et (I_3I_3). Elles sont parcourues par des courants égaux ou proportionnels à ceux

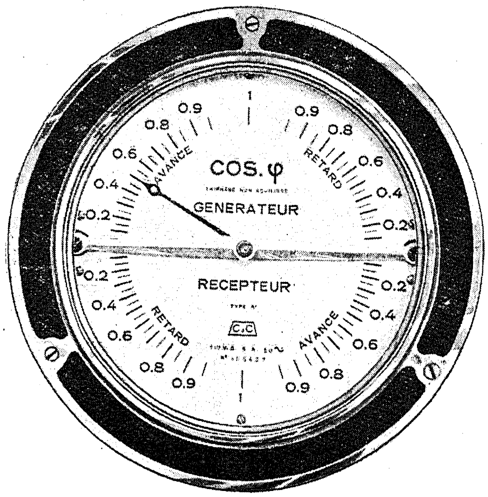


Fig. 3. — Phasemètre triphasé à fer tournant, échelle 360°, pour circuits non équilibrés. Vue de face.

du circuit dont on mesure le cos φ, et produisent un champ radial, *tournant* lorsque les courants sont équilibrés, ou *elliptique* lorsque les courants ne sont pas équilibrés.

Nous verrons, dans la suite, que l'action du champ radial produit par le stator S sur les fers aimantés par les bobines B_1 et B_2, donne à l'équipage mobile une position qui fait, avec une direction fixe appropriée, un angle égal à φ_d, et ceci quel que soit le déséquilibrage des courants, pourvu que les tensions soient équilibrées.

La figure 3 donne une vue de face du phasemètre. La partie supérieure de l'échelle correspond au cas où le circuit dont on mesure le cos φ *fournit* de la puissance (générateur) et la partie inférieure au cas où il *absorbe* de la puissance (récepteur).

L'appareil est donc tout indiqué pour le cas des échanges d'énergie dans les deux sens entre circuits ou entre réseaux ; mais nous ver-

rons, dans la suite, que les quatre quadrants peuvent être utiles

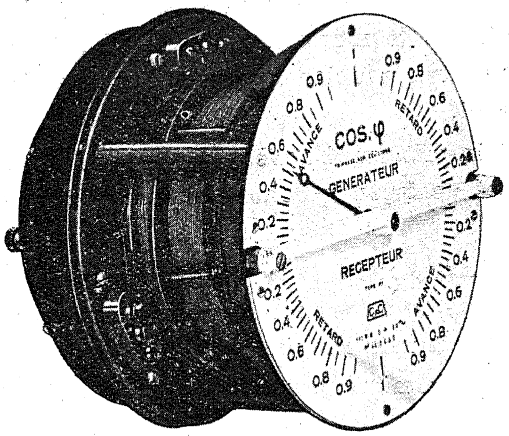


Fig. 4. — Phasemètre triphasé.
Vue de côté, couvercle enlevé.

même dans les circuits dans lesquels la puissance ne circule que dans un sens.

La figure 4 donne une vue de côté de l'appareil, couvercle retiré ;

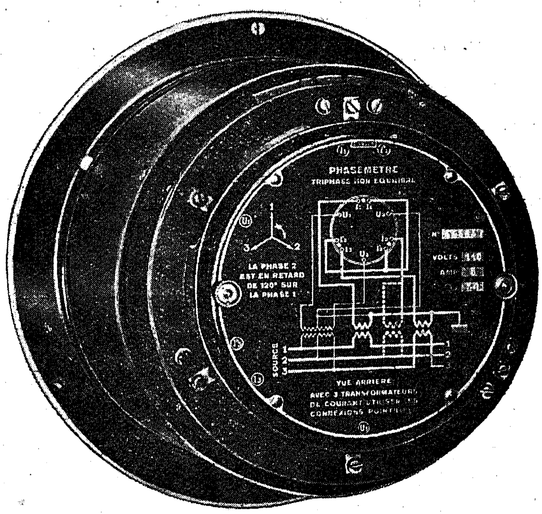


Fig. 5. — Phasemètre triphasé.
Vue arrière.

on aperçoit la couronne en fer qui entoure les bobines et les fers et qui protège ceux-ci contre les actions magnétiques extérieures.

La figure 5 donne une vue arrière du phasemètre. On remarque

que l'appareil porte un schéma de montage complet, analogue à celui de la figure 2. Dans les deux schémas, on a supposé le phasemètre alimenté par deux transformateurs de tension et deux transformateurs de courant. On a marqué, en pointillé, le complément de schéma qu'on aurait à adopter lorsqu'on dispose de trois transformateurs de courant.

Le schéma est inscrit sur l'arrière de la « boîte additionnelle » ; le tout est disposé de façon qu'on ne puisse faire aucune erreur de connexion.

Grâce à cette circonstance, le phasemètre peut servir à vérifier et à corriger les erreurs de connexion des transformateurs ou des compteurs, montés sur le même circuit.

Le fait que le phasemètre porte quatre quadrants facilite le contrôle.

On connaît en effet, en général, le sens du déphasage dans un circuit et approximativement sa valeur. Si le phasemètre n'indique pas ce qu'on attend, on peut souvent déduire, de la valeur qu'il indique, l'erreur qui existe dans le montage (inversion d'un courant ou d'une tension, ordre des phases inverse de celui indiqué sur le schéma, etc.) surtout après avoir fait quelques changements de connexion qui permettent de vérifier les conclusions tirées des premières mesures.

Comme l'appareil donne des indications dans les quatre quadrants, le contrôle est fortement facilité.

Ce qui précède peut avoir une grande importance, parce que les erreurs de montage dans les transformateurs sont assez fréquentes et entraînent des erreurs dans les indications des compteurs.

6. — *Théorie du phasemètre à fer tournant pour circuits non équilibrés.* — I. — *Les tensions qui alimentent le phasemètre sont équilibrées, les courants étant quelconques.* Le courant alternatif de la bobine B_1 (fig. 1) donne au fer A_1 une aimantation alternative ; les lignes d'induction suivent le fer, mais leurs composantes radiales interviennent seules dans le fonctionnement de l'appareil, de sorte que tout se passe comme si le fer A_1 était formé de deux palettes A_1 et A^1, (fig. 6) dans le prolongement l'une de l'autre. On a donc affaire à un aimant alternatif dont le moment magnétique $\mathfrak{M}_1$ a la direction de l'axe A'A et une valeur numérique proportionnelle au courant i'_1 dans la bobine B_1 ou à la différence de potentiel u'_1 aux bornes du circuit XU_2 (fig. 2) contenant cette bobine.

Si u'_1 est de la forme :

$$u'_1 = U_m \cos \omega t,$$

$\mathcal{M}_1$ sera de la forme :

$$\mathcal{M}_1 = \mathcal{M}_m \cos \omega t, \qquad (12)$$

et on sait que, dans ce cas, il peut être considéré comme résultant de

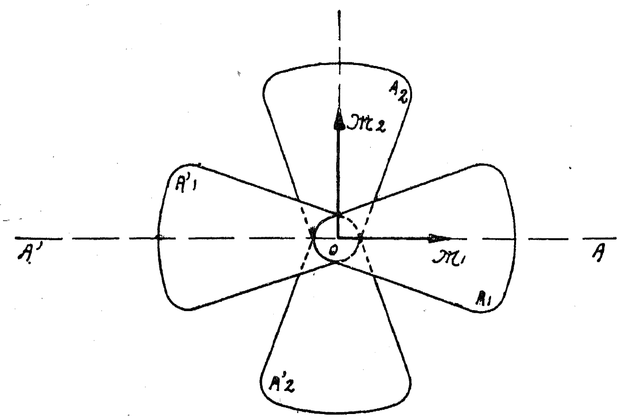


Fig. 6. — Vue des fers et représentation de leurs moments magnétiques.

deux moments magnétiques, $\mathcal{M}$ et $\mathcal{M}'$ ayant la même valeur constante $\mathcal{M}_m$ et tournant dans les sens des flèches f et f' (fig. 7) avec la même vitesse ω.

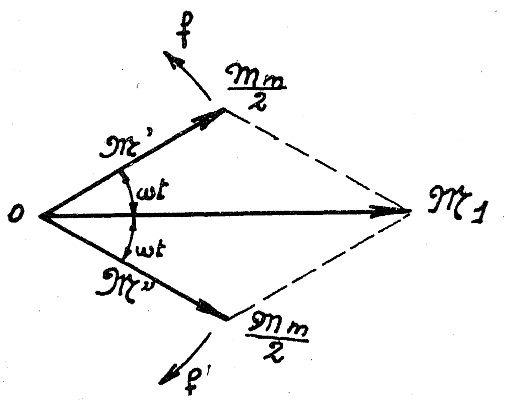


Fig. 7. — Décomposition du moment magnétique M_1 alternatif en deux moments tournants M' et M''

De même le fer A_2 A'_2 (fig. 6) aimanté par la bobine B_2 (fig. 1) a un moment magnétique $\mathcal{M}_2$ proportionnel à la tension u'_2 aux bornes de circuit XU_3 et de la forme :

$$\mathcal{M}_2 = \mathcal{M}_m \sin \omega t, \qquad (13)$$

la tension u'_2 étant, d'après ce qu'on a vu antérieurement, en qua-

drature avec u'_1, lorsque les tensions triphasées sont équilibrées. Le moment $\mathfrak{M}_2$ peut être considéré comme résultant de deux moments magnétiques, $\mathfrak{M}'''$ et $\mathfrak{M}''''$ (fig. 8) tournant dans les sens des flèches f' et f avec la vitesse angulaire ω.

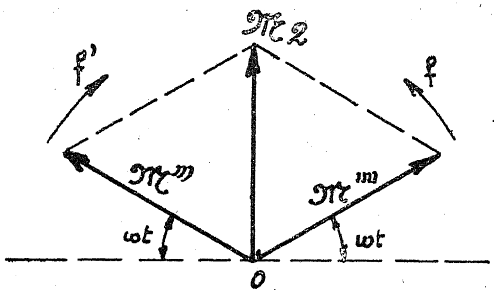


Fig. 8 — Décomposition du moment magnétique M_2 alternatif en deux moments tournants M''' et M''''.

Les deux fers aimantés A_1,A'_1 et A_2,A'_2 étant solidaires et se trouvant placés dans le même champ magnétique, se comportent comme un fer aimanté unique, ayant comme moment le moment résultant de

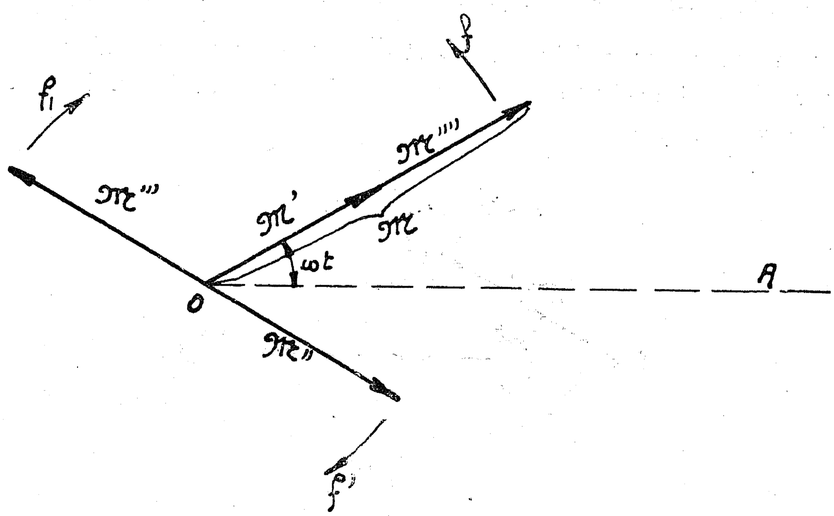


Fig. 9. — Obtention du moment magnétique résultant M de l'ensemble des 2 fers aimantés

$\mathfrak{M}'$, $\mathfrak{M}''$, $\mathfrak{M}'''$ et $\mathfrak{M}''''$. On voit d'après la figure 9, que ce moment est un moment tournant dans le sens de la flèche f et ayant la valeur numérique constante :

(14) $$\mathfrak{M} = \mathfrak{M}' + \mathfrak{M}'' = \mathfrak{M}_m$$

proportionnel à la valeur efficace commune U' des tensions diphasées ou à celle U des tensions triphasées.

En résumé : L'ensemble des fers $A_1A'_1$ et $A_2A'_2$ aimantés par les bobines B_1 et B_2 équivaut à un aimant de moment magnétique constant :

(15) $$\mathcal{M} = kU,$$

mais qui tourne *par rapport à l'équipage mobile* d'un mouvement uniforme de vitesse augulaire ω dans le sens de la flèche f. (fig. 9). L'axe de cet aimant se confond, à l'instant $t = o$, avec l'axe oA du fer $A_1A'_1$ (fig. 6).

Ceci étant, supposons, pour l'instant, que les courants du circuit forment un système équilibré. Les bobines

(I_1I'), $(I_2I'_2)$ et $(I_3I'_3)$ (*fig.* 2)

produisent alors un champ magnétique radial tournant, dont la vitesse augulaire est ω et dont le sens sera le même que celui de l'aimant $\mathcal{M}$, pour un choix approprié des connexions. Ce champ tournant a une valeur constante :

(16) $$\mathcal{H} = k'I,$$

I étant la valeur efficace de l'un des courants du circuit dont on mesure le $\cos\varphi$; sa direction est confondue avec l'axe de l'une des bobines par exemple $(I_1I'_1)$ lorsque le courant est maximum dans cette bobine.

Supposons que le courant qui passe dans la bobine $(I_1I'_1)$ soit de la forme :

(17) $$i_1 = I\sqrt{2}\cos\left(\omega t - \frac{\pi}{4} - \varphi\right),$$

il sera donc maximum à l'instant t_1 donné par la formule :

(18) $$\omega t_1 = \frac{\pi}{4} + \varphi.$$

A cet instant, la direction du champ $\mathcal{H}$ sera confondue avec celle de l'axe de la bobine $(I_1I'_1)$; au même instant, la direction du moment $\mathcal{M}$ fera avec l'axe OA du fer (A_1, A'_1) un angle $\left(\frac{\pi}{4} + \varphi\right)$ et on aura la disposition de la fig. 10, en désignant par α l'angle de $\mathcal{M}$ avec $\mathcal{H}$. On a :

(19) $$\alpha + \beta = \frac{\pi}{4} + \varphi.$$

Le couple produit sur l'aimant $\mathcal{M}$ est :

(20) $$C = \mathcal{M}.\mathcal{H}.\sin\alpha\,;$$

ce couple étant nul, car il n'existe aucun couple antagoniste, on a :

$\alpha = O$ et la formule (19) donne :

(21) $$\beta - \frac{\pi}{4} = \varphi.$$

L'angle β que fait l'axe du fer (A_1A_1') avec l'axe de la bobine ($I_1I'_1$) diminué de $\pi/4$, est égal à φ. On peut donc graduer l'appareil en φ ou en cos φ.

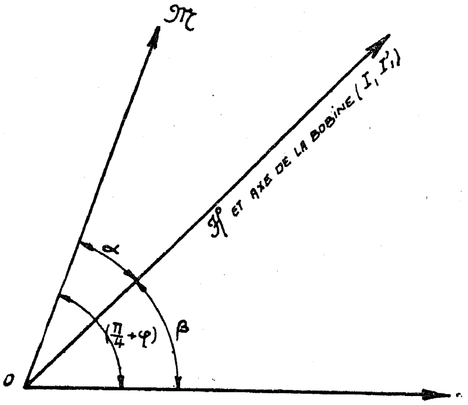


Fig. 10. — Diagramme de fonctionnement du phasemètre avec tensions équilibrées et courants non équilibrés.

On a vérifié pratiquement que les déviations de l'aiguille, par rapport à une direction appropriée, sont égales à φ *avec une très grande approximation.*

Supposons maintenant les courants non équilibrés, les tensions restant équilibrées. Le système des *composantes directes* des courants produit un champ magnétique, qui tourne dans le même sens que l'aimant $\mathfrak{M}$. Son action sur celui-ci produit un couple analogue au précédent.

Par contre, le système des composantes inverses des courants produit un champ tournant dans le sens inverse du précédent, il a donc un mouvement de vitesse 2ω par rapport à $\mathfrak{M}$ et son couple moyen est nul.

Donc *le système des composantes directes des courants agit seul sur les fers aimantés et impose à l'équipage mobile une position qui dépendra du déphasage* φ_d *entre les composantes directes des courants et les tensions triphasées.*

II. — *Les tensions et les courants sont déséquilibrés.* — Dans ce cas les aimantations produites par les bobines B_1 et B_2 sur les fers A_1 et A_2

n'ont plus la même grandeur maximum et ne sont plus en quadrature dans le temps. Mais, si on décompose le système de tensions en ses composantes symétriques, on démontre, par des considérations analogues à celles du paragraphe précédent, que le système direct des tensions produit sur les fers une aimantation $\mathcal{M}_d$ proportionnelle à la valeur efficace U_d de la composante directe et tournant par rapport à l'équipage mobile dans le sens direct avec la vitesse angulaire ω ; tandis que le système inverse produit une aimantation $\mathcal{M}_i$ proportionnelle à la valeur efficace U_i de la composante inverse et tournant dans le sens contraire au précédent avec la même vitesse ω.

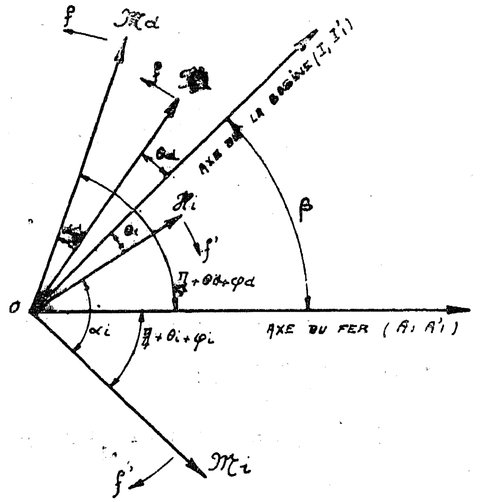


Fig. 11. — Diagramme de fonctionnement du phasemètre avec tensions et courants non équilibrés.

De même, le système des courants passant dans les trois phases du stator produisent un champ elliptique décomposable en deux champs tournants, de même vitesse ω : l'un, $\mathcal{H}_d$, proportionnel à la valeur efficace I_d du système direct, tourne dans le sens direct, l'autre $\mathcal{H}_i$ proportionnel à la valeur efficace I_i du système inverse, tourne dans le sens contraire au précédent.

Chaque champ ne produit un couple moyen différent de zéro que par son action sur l'aimantation qui tourne dans le même sens que lui. L'équipage mobile est donc soumis à deux couples :

(22) $$C_d = kU_dI_d \sin \alpha_d$$

et

(23) $$C_i = kU_iI_i \sin \alpha_i,$$

α_d et α_i étant les angles respectifs entre $\mathcal{H}_d$ et $\mathcal{M}_d$, et entre $\mathcal{H}_i$ et $\mathcal{M}_i$ (fig. 11).

Si θ_d et θ_i sont les angles que font à un instant t le champ direct $\mathcal{H}_d$ et le champ inverse $\mathcal{H}_i$ avec l'axe de la bobine ($I_1I'_1$), si $\left(\frac{\pi}{4}+\varphi_d\right)$ est le déphasage en arrière de I_d sur U_d et $\left(\frac{\pi}{4}+\varphi_i\right)$ le déphasage arrière de I_i sur U_i, on a la disposition des axes et des vecteurs de la fig. 11 ; d'où l'on voit facilement que les couples C_d et C_i agissent en sens contraires. Pour l'équilibre de l'équipage mobile on a donc :

$$C_d = C_i$$

ou

$$U_dI_d \sin \alpha_d = U_iI_i \sin \alpha_i. \tag{24}$$

Or, de la fig. 11 on déduit ;

$$\alpha_d + \theta_d + \beta = \frac{\pi}{4} + \theta_d + \varphi_d,$$

d'où on tire :

$$\alpha_d = \frac{\pi}{4} + \varphi_d - \beta ;$$

et aussi :

$$\alpha_i = \frac{\pi}{4} + \varphi_i - \beta.$$

En remplaçant dans (24) on obtient :

$$U_dI_d \sin\left(\frac{\pi}{4} + \varphi_d - \beta\right) = U_iI_i \sin\left(\frac{\pi}{4} + \varphi_i - \beta\right).$$

On en déduit :

$$\text{tang } \varphi' = \frac{U_dI_d \sin \varphi_d - U_iI_i \sin \varphi_i}{U_dI_d \cos \varphi_d - U_iI_i \cos \varphi_i}$$

en posant :

$$\varphi' = \beta - \frac{\pi}{4}$$

ou

$$\text{tg } \varphi' = \frac{\sin \varphi_d - \varepsilon_u . \varepsilon_i . \sin \varphi_i}{\cos \varphi_d - \varepsilon_u . \varepsilon_i . \cos \varphi_i}. \tag{25}$$

On voit immédiatement que, pour les tensions ou les courants équilibrés, soit : $U_i = 0$ ou $I_i = 0$, on a :

$$\text{tg } \varphi' = \text{tg } \varphi_d \qquad \text{donc} \qquad \cos \varphi' = \cos \varphi_d,$$

et on retrouve le cas I.

Dans le cas général on a :

$$\cos \varphi' = \frac{\cos \varphi_d - \varepsilon_u \varepsilon_i \cos \varphi_i}{\sqrt{1 + \varepsilon_u^2 \varepsilon_i^2 - 2\varepsilon_u \varepsilon_i \cos (\varphi_d - \varphi_i)}}. \tag{26}$$

Un calcul analogue à celui que l'on a fait au paragraphe 2 nous donne, pour la valeur relative de la différence de cos φ' et cos φ_d la valeur :

$$\frac{\cos \varphi' - \cos \varphi_d}{\cos \varphi_d} = - \varepsilon_u \varepsilon_i \operatorname{tg} \varphi_d \sin (\varphi_d + \varphi_i), \tag{27}$$

valeur égale et de signe contraire à la valeur relative de la différence entre cos φ défini par la formule (4) et cos φ_d [voir formule (10)]. La différence précédente est donc négligeable pour les déséquilibrages que l'on rencontre pratiquement.

Remarques. — 1° On peut remarquer que l'angle $\varphi' = \beta - \frac{\pi}{4}$ est l'angle fait avec l'axe de la bobine ($I_1 I'_1$) l'une des bissectrices de l'angle des deux fers.

2° Lorsque les tensions et les courants sont déséquilibrés, on peut faire indiquer au phasemètre cos φ_d, en alimentant les bobines B_1 et B_2, par les deux composantes directes du système de tensions diphasé équivalent au système triphasé et obtenu par filtrage à l'aide du filtre triphasé-diphasé de la Compagnie pour la Fabrication des Compteurs (1).

(1) Voir : Iliovici, *Dispositifs de protection basés sur le déséquilibrage des courants, des tensions et de puissance.* — Conférence internationale des Grands Réseaux Electriques, session 1929, tome III, p. 464.

INFORMATIONS
DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRICIENS

Elévations dans l'ordre de la Légion d'Honneur.

Nous avons appris, avec le plus vif plaisir, que notre ancien Président, M. le Professeur D'ARSONVAL, membre de l'Institut, vient d'être élevé à la dignité de Grand Croix, M. AZARIA, à celle de Grand Officier, M. DROUET, a été promu Officier, et MM. CARRIÈRE, ESBRAN et Gustave MEUNIER, ont été nommés Chevaliers.

25e Réunion annuelle de l'Illuminatig Engineering Society.

Cette société nous fait connaître qu'elle célébrera ses noces d'argent, du 12 au 16 octobre 1931, à l'hôtel William Penn, à Pittsburgh. Les rapports présentés et les discussions qui suivront, seront principalement consacrés à l'éclairage des pistes et des champs d'atterrissage d'aviation.

BAR-LE-DUC. — IMP. COMTE-JACQUET

Le gérant : Alfred MAGNIER.

5e série, tome I, n° 10. Octobre 1931

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS

SOMMAIRE

COMMUNICATIONS TECHNIQUES ET DISCUSSIONS (1) :

Exploitation des lignes de contact de la Compagnie d'Orléans (M. BARILLOT), p. 998. — Les sous-stations automatiques de traction de la Compagnie d'Orléans (M. BARILLOT), p. 1021. — Application des redresseurs à la charge des batteries de traction M. GIROZ), p 1032. — Contribution à l'étude du choix des modes d'excitation des dynamos en traction électrique à courant continu. Introduction à la régulation économique de la vitesse (M. GRATZMULLER), p. 1067. — Etude des clauses techniques en vue de l'établissement éventuel d'un cahier des charges pour les condensateurs destinés à l'amélioration du facteur de puissance des réseaux (M. de la GORCE), p. 1088. — Les accidents dus à l'électricité et les moyens de secours actuels (M. LEGENDRE), p. 1091 — Méthodes de mesure des pertes dans les diélectriques (M. VASSILIÈRE-ARLHAC), p. 1105.

BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS, p. 1125.

IL Y A TRENTE ANS, p. 1128.

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

EXPLOITATION DES LIGNES DE CONTACT DE LA COMPAGNIE D'ORLÉANS [1]

(Conditions d'alimentation — Protection — Sélection des défauts)

par M. Barillot

Ingénieur-chef du Service électrique
de la Compagnie du Chemin de fer de Paris-Orléans

I. Schéma d'alimentation des lignes de contact : voies principales, sectionnements automatiques, mise en parallèle, sectionnements non automatiques ; voies secondaires, alimentation de secours des voies secondaires de grandes gares. — II. Description des installations assurant l'alimentation, le sectionnement et la mise en parallèle des lignes de contact : 1° Région parisienne : A. Disjoncteurs de 1re catégorie, dispositif de commande à distance, tableau de commande, enclenchements électriques et déclenchement à distance des disjoncteurs d'une voie ; dispositif de secours de la commande à distance. — B. Disjoncteurs de 2e catégorie. 2° Ligne Etampes-Vierzon. — III. Conditions d'utilisation des installations. — IV. Résultats d'exploitation. — Dispositions prévues pour les électrifications à venir.

La première tranche d'électrification entreprise par la Compagnie d'Orléans englobe des lignes à très fort trafic comportant des sections à voies multiples (voie quadruple entre Paris et Etampes et entre Orléans et Cercottes, voie triple entre Cercottes et Toury) et des gares très importantes telles que la gare de Brétigny dont le développement total atteint 55 km, celle de Juvisy (63 km) et celle des Aubrais-Orléans (58 km). (Voir fig. 1).

Du fait de la complexité des installations de voies, il a été nécessaire de procéder à une étude approfondie des conditions d'exploitation des lignes de contact, en vue de déterminer les dispositions à adopter pour réduire au minimum les répercussions d'une avarie survenant aux conducteurs de prise de courant.

Après avoir exposé les principes sur lesquels a été basé le schéma du réseau des lignes de contact distribuant aux tracteurs le courant continu 1 500 V, nous décrirons les installations assurant l'alimentation, le sectionnement et la mise en parallèle de ces lignes, nous préciserons le rôle des divers services dans l'utilisation de ces installations,

---

(1) Ce rapport sera discuté à la Semaine de discussions de Novembre 1931.

puis nous indiquerons les résultats obtenus en cours d'exploitation et nous donnerons quelques détails sur les dispositions prévues pour l'équipement des lignes dont l'électrification est projetée.

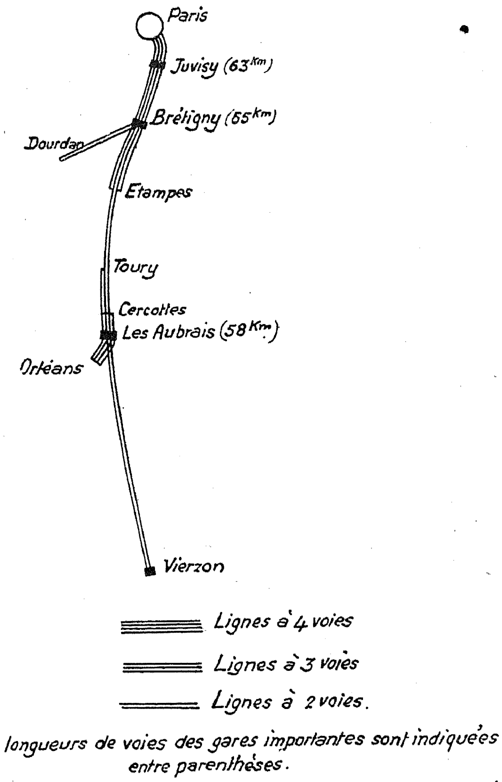


Fig. 1. — Lignes électrifiées en première étape par la Compagnie d'Orléans.

I. — Schéma d'alimentation des lignes de contact

Il a été posé en principe qu'une avarie à une ligne de contact ne devait jamais avoir de répercussions plus étendues qu'une avarie à la voie de roulement correspondante et qu'en particulier tout défaut sur la ligne de contact d'une voie ne devait causer aucune perturbation dans l'alimentation des lignes de contact voisines.

Pour répondre à ces conditions, les dispositions générales suivantes ont été arrêtées pour la constitution du réseau de distribution du courant de traction.

Les lignes de contact des voies principales sont isolées les unes des autres et sont alimentées dans les sous-stations par des disjoncteurs distincts. Pour limiter la répercussion des incidents, elles sont sectionnées au droit de chaque sous-station et en un point intermédiaire entre

deux sous-stations, situé autant que possible à égale distance de celles-ci. Au droit de ces sectionnements, chaque portion de ligne de contact est alimentée par un disjoncteur distinct.

Pour réduire la chute de tension en ligne, la mise en parallèle des diverses lignes de contact a été réalisée tous les 4 km environ entre Paris et Orléans et dans chaque gare entre Orléans et Vierzon. Les lignes de contact sont reliées à une barre de mise en parallèle par l'intermédiaire de disjoncteurs. La mise en parallèle des lignes de contact est également réalisée dans les postes de sectionnement intermédiaires.

Sur la barre des postes de mise en parallèle ou de sectionnement situés à proximité de gares importantes sont en outre branchés par l'intermédiaire de disjoncteurs, des feeders alimentant les lignes de contact des voies ou faisceaux de voies accessoires de ces gares.

Les disjoncteurs utilisés pour l'alimentation, le sectionnement et la mise en parallèle des lignes de contact sont du type ultra rapide et polarisé comme d'ailleurs ceux assurant dans les sous-stations la protection des commutatrices.

Le principe du fonctionnement de ces appareils est rappelé brièvement ci-après.

Le contact mobile de ces disjoncteurs est maintenu en position de fermeture par un électro-aimant. Une spire parcourue par une fraction du courant de ligne produit pour un certain sens de ce courant un effet démagnétisant sur l'électro de maintien. Lorsque l'intensité est suffisante, l'attraction de l'électro-aimant devient inférieure à l'effort de ressorts antagonistes et le disjoncteur déclenche.

Ces principes étant posés, les bases sur lesquelles ont été établis les schémas d'alimentation, de sectionnement et de mise en parallèle des lignes de contact sont indiquées ci-après :

1° pour les voies principales ou de circulation générale des trains;
2° pour les voies accessoires.

VOIES PRINCIPALES. — La disposition normale des circuits de puissance des voies principales est représentée sur la fig. 2.

L'ensemble des lignes de contact comprises entre les deux sectionnements intermédiaires encadrant une sous-station constitue la zone de la sous-station.

L'ensemble des lignes de contact comprises entre le sectionnement situé au droit de la sous-station et un des sectionnements intermédiaires encadrant la sous-station, constitue un des secteurs de la sous-station.

Sectionnements automatiques. — Les sectionnements prévus au

droit de chaque sous-station et les sectionnements intermédiaires sont des sectionnements dits à lame d'air. Les conducteurs correspondant aux extrémités de chaque tronçon chevauchent sur une certaine

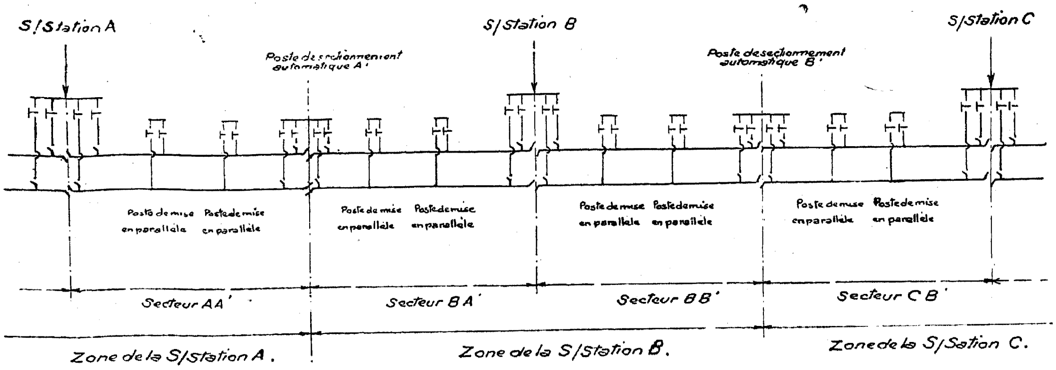


Fig. 2. — Alimentation, sectionnement et mise en parallèle des voies électrifiées. Disposition normale des circuits de puissance des voies principales (cas de 2 voies).

distance pour guider le pantographe des machines. Il résulte de cette disposition qu'un pantographe passant sur un sectionnement, met en communication électrique les deux portions de lignes de contact contiguës.

Dans le cas où l'isolement d'une ligne de contact d'un secteur a été

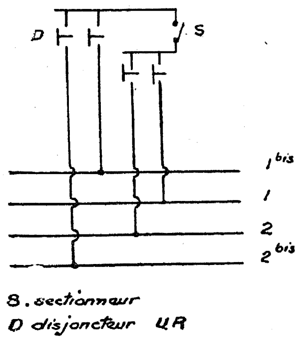


Fig 3. — Schéma d'un poste de mise en parallèle de 4 voies (Paris-Orléans).

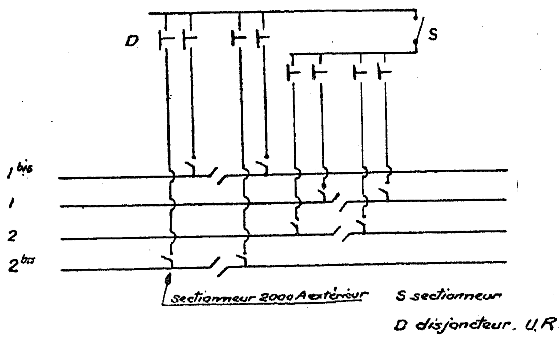


Fig 4. — Schéma d'un poste de sectionnement intermédiaire de 4 voies (Paris-Orléans).

effectué à la suite d'un incident ou pour des travaux d'entretien, il est donc indispensable de prendre des dispositions en vue d'éviter qu'un tracteur ayant son pantographe en prise, puisse remettre sous tension la portion de ligne de contact isolée.

Mise en parallèle. — Sur les lignes à 4 voies, les postes de section-

nement intermédiaires et les postes de mise en parallèle comportent deux barres omnibus. Ces barres peuvent être mises en parallèle par un sectionneur.

Sur l'une de ces barres sont branchés les départs correspondant aux voies centrales 1 et 2 et sur l'autre les départs correspondant aux voies extérieures 1 *bis* et 2 *bis*. Cette disposition permet de réaliser la mise en parallèle des voies de chacun des groupes, tout en se réservant la possibilité de rendre complètement indépendantes des voies de banlieue, les voies parcourues par les express (voir fig. 3 et 4).

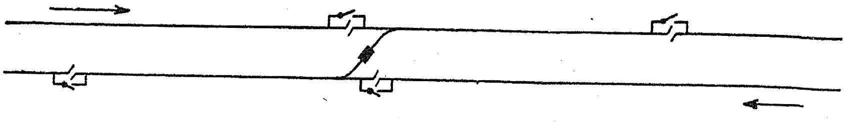


Fig. 5.

Sectionnements non automatiques. — Outre les sectionnements équipés avec des disjoncteurs automatiques, il existe d'autres sectionnements à lame d'air, normalement pontés par des sectionneurs manœuvrés à la main.

Ces sectionnements permettent de réduire la longueur des lignes de contact privées de courant par suite d'accidents ou de travaux. En particulier, ils sont disposés de façon à permettre l'utilisation d'appareils de voies pour la déviation des trains dans le cas d'incidents nécessitant la coupure du courant sur une portion de la ligne de contact de la voie normalement empruntée.

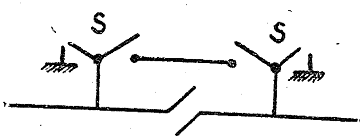


Fig. 6.

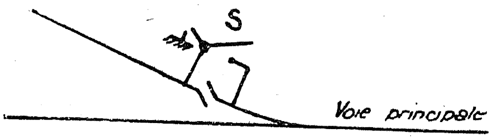


Fig. 7.

Sur la fig. 5 est indiquée la disposition adoptée pour permettre l'utilisation d'un diagonal.

Chacun de ces sectionnements est équipé avec deux sectionneurs 2 000 A à talon de mise à la terre et à commande mécanique, montés conformément à la fig. 6 ci-dessous.

Ce montage permet de réaliser l'isolement et la mise à la terre de l'une ou l'autre des portions de ligne de contact adjacentes au sectionnement.

La manœuvre de ces appareils (ouverture ou fermeture) ne doit

s'effectuer qu'après déclenchement des disjoncteurs d'alimentation de mise en parallèle et de sectionnement de la voie correspondante.

VOIES SECONDAIRES. — *a)* Voies secondaires de faible développement (voies de service et de garage de petites gares).

Ces voies sont alimentées par l'intermédiaire d'un sectionneur pris en dérivation sur la ligne de contact d'une voie principale. Ce sectionneur qui est pourvu d'un talon de mise à la terre, est branché conformément à la fig. 7 ci-dessous :

Le sectionneur est normalement ouvert et assure la mise à la terre des lignes de contact de la gare. Celles-ci ne sont mises sous tension

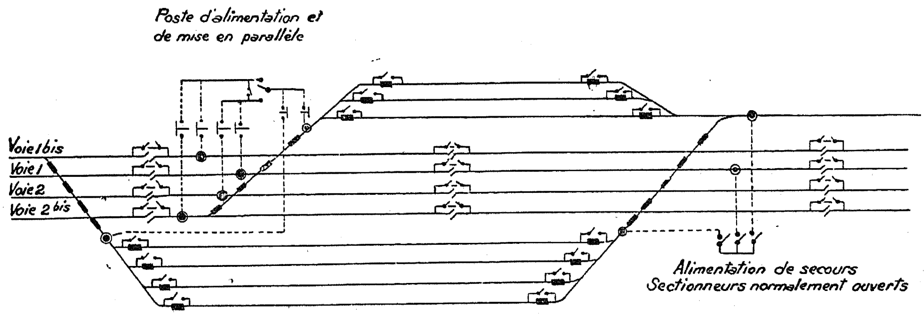


Fig. 8. — Alimentation, sectionnement et mise en parallèle des voies électrifiées. Alimentation et sectionnement des lignes de contact des voies accessoires (disposition générale).

que lorsqu'un tracteur est amené à circuler sur les voies correspondantes.

b) Voies secondaires de développement important (voies de circulation des grandes gares, faisceaux de réception, de triage, etc...)

Les lignes de contact de ces voies sont alimentées par des disjoncteurs branchés sur la barre omnibus du poste de sectionnement ou de mise en parallèle le plus rapproché (voir fig. n° 8).

Dans un certain nombre de gares importantes (Juvisy, les Aubrais, Orléans, Vierzon), il a été installé des postes de mise en parallèle supplémentaires, pour réduire la longueur des feeders d'alimentation des voies accessoires.

Les voies ou faisceaux de voies ayant une affectation bien déterminée, sont alimentés par un disjoncteur distinct. Quelques faisceaux de triage très étendus ont été fractionnés en faisceaux secondaires alimentés chacun par un disjoncteur.

A chaque voie d'un faisceau, correspond un système de sectionneurs à main, permettant de réaliser rapidement l'isolement de la ligne de contact de la voie.

Alimentation de secours des voies secondaires de grandes gares.

Dans les grandes gares, il est prévu pour chacun des groupes de voies accessoires dépendant d'un disjoncteur, une alimentation de secours permettant d'assurer la mise sous tension des lignes de contact correspondantes en cas d'avarie du disjoncteur d'alimentation.

Il existe deux catégories d'alimentation de secours :

a) Alimentation de secours par disjoncteur : C'est le cas où la voie ou le faisceau peut être alimenté par l'intermédiaire de deux postes de mise en parallèle. En service normal, l'alimentation n'est effectuée que par un disjoncteur. L'autre disjoncteur n'est enclenché qu'en cas d'avarie du disjoncteur d'alimentation normal.

b) Alimentation de secours par sectionneurs :

Des sectionneurs à main permettent de brancher les lignes de contact d'un faisceau sur une barre de secours qui est elle-même branchée par l'intermédiaire d'un sectionneur sur la ligne de contact d'une voie principale (voir fig. n° 8).

II. — Description des installations assurant l'alimentation, le sectionnement et la mise en parallèle des lignes de contact.

Dans la région parisienne (lignes Paris-Etampes, Brétigny-Dourdan), l'importance du trafic a nécessité l'adoption de mesures particulières dans la réalisation des installations d'alimentation, de sectionnement et de mise en parallèle.

A partir d'Etampes et surtout au delà d'Orléans, la diminution du nombre des trains a permis de se contenter de dispositions moins complètes, mais aussi moins onéreuses.

Région parisienne.

Les disjoncteurs ultra-rapides, installés dans les postes de sectionnement et de mise en parallèle ont leurs bobines de maintien alimentées à 600 V ; leurs bobines d'enclenchement sont alimentées à 1 500 V par l'intermédiaire de contacteurs fonctionnant sous 600 V.

Le courant continu 600 V, nécessaire à l'alimentation des bobines de maintien et des contacteurs de fermeture est produit dans les sous-stations par des groupes moteurs-générateurs et est distribué le long de la ligne par une canalisation bifilaire en cuivre nu montée sur isolateurs. Cette canalisation qui est sectionnée dans les postes

de sectionnement et dans les sous-stations alimente en dérivation les postes de mise en parallèle (voir fig. 9).

La polarisation des disjoncteurs est telle qu'ils ne peuvent déclencher que pour un sens de circulation du courant dirigé de la barre du poste vers la ligne.

Les disjoncteurs suivant leur affectation et leur mode de commande sont divisés en deux catégories :

A. — *Disjoncteurs de 1re catégorie.* — Ils assurent la mise en parallèle et le sectionnement des voies principales, ainsi que l'alimentation de certains tronçons de voies principales et des voies de circulation de grandes gares.

Pour réduire au minimum les risques de fausse manœuvre lors

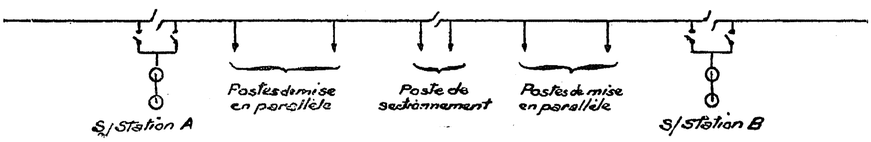


Fig. 9.

de la coupure ou du rétablissement du courant sur les lignes de contact des voies intéressant la circulation générale des trains, ces disjoncteurs sont enclenchés et déclenchés à distance par les agents des sous-stations.

Il existe de plus un certain nombre d'enclenchements électriques entre les disjoncteurs d'alimentation de sectionnement et de mise en parallèle des voies principales d'un secteur permettant d'obtenir les conditions de fonctionnement suivantes :

1° Déclenchement du disjoncteur d'alimentation (disjoncteur de feeder) et des autres disjoncteurs de mise en parallèle et de sectionnement correspondant à une ligne de contact, dans le cas du déclenchement automatique d'un disjoncteur de mise en parallèle ou de sectionnement de la voie correspondante.

2° Déclenchement des disjoncteurs de sectionnement et de mise en parallèle d'une voie, dans le cas du déclenchement automatique ou commandé du disjoncteur d'alimentation de la voie.

D'autre part, l'isolement de la portion de ligne de contact d'une voie comprise dans un secteur, peut être obtenu par la manœuvre d'interrupteurs placés dans des coffrets répartis le long des voies principales tous les 300 m. environ, l'ouverture d'un de ces interrupteurs provoquant le déclenchement simultané de tous les disjoncteurs de la voie, y compris le disjoncteur de feeder.

L'alimentation à 1 500 V de la bobine d'enclenchement des disjoncteurs de 1re catégorie, est assurée de façon différente suivant leur affectation.

Les disjoncteurs, dits de mise en parallèle qui, tout en effectuant la mise en parallèle des lignes de contact, assurent l'alimentation de la barre omnibus des postes, ont leur bobine d'enclenchement branchée sur la ligne de contact correspondante et dans ces conditions ne peuvent être enclenchés si cette ligne de contact n'est pas sous tension (voir fig. 10).

Les disjoncteurs, dits d'alimentation qui, par l'intermédiaire des barres de mise en parallèle, alimentent des tronçons de voies principales ou des voies de circulation des grandes gares, ont leur

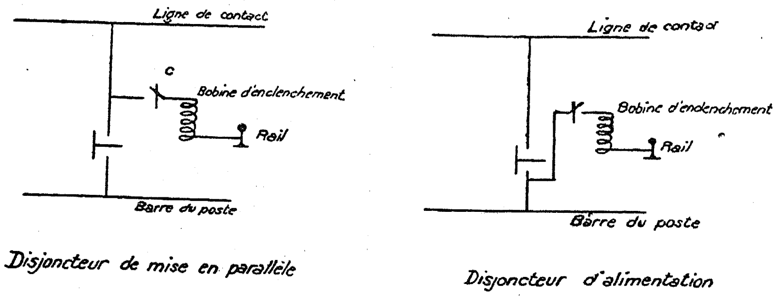


Fig. 10.

bobine d'enclenchement branchée sur la barre omnibus des postes et, dans ces conditions, ne peuvent être enclenchés si cette barre n'est pas sous tension (voir fig. 10).

Dans les postes de sectionnement automatique, les disjoncteurs correspondant à l'un des secteurs encadrant le sectionnement, sont équipés en disjoncteurs d'alimentation, alors que les disjoncteurs correspondant à l'autre sont équipés en disjoncteurs de mise en parallèle.

Cette disposition, qui permet l'alimentation du premier secteur par l'autre, a été adoptée pour pouvoir, dans certains secteurs, rétablir rapidement le courant entre une section élémentaire isolée et le poste de sectionnement automatique.

DESCRIPTION DU DISPOSITIF DE COMMANDE A DISTANCE DES DISJONCTEURS DE 1re CATÉGORIE.

Chaque sous-station assure la commande et le contrôle des disjoncteurs de 1re catégorie de sa zone.

Dans ces conditions et d'après les schémas actuels de sectionne-

ment, le nombre de disjoncteurs commandés par chacune des sous-stations de la section Paris-Etampes, Brétigny-Dourdan est le suivant :

Sous-station du Quai de la Gare	Secteur Quai de la Gare — Orsay.......	9
	Secteur Quai de la Gare — La Cuve......	16
Sous-station de La Plaine	Secteur La Plaine — La Cuve............	6
	Secteur La Plaine — Saint-Martin........	19
Sous-station des Saugées	Secteur Les Saugées — Saint-Martin......	8
	Secteur Les Saugées — Bouray-Arpajon...	18
Sous-station de Bellevue	Secteur Bellevue-Bouray.................	8
	Secteur Bellevue-Etampes................	13
Sous-station de St.-Evroult	Secteur Saint-Evroult-Arpajon............	6
	Secteur Saint-Evroult-Dourdan...........	4
	Total des disjoncteurs de 1re Catégorie :	107

Si l'on avait adopté, pour assurer la commande et la signalisation individuelle de ces disjoncteurs, le dispositif de contrôle normal qui nécessite l'installation de 4 conducteurs par appareil, on aurait été conduit à prévoir l'installation le long des voies, de circuits très complexes. Pour éviter la pose de tels circuits, on a réalisé l'installation d'un système transmetteur d'ordres, capable de commander à distance à l'aide d'un nombre de fils restreint, un grand nombre d'appareils situés dans des postes différents.

Ce système est basé sur l'utilisation de distributeurs dont les balais tournent au synchronisme dans le poste de commande (sous-station) et dans les postes commandés (postes de sectionnement et de mise en parallèle) et dont chaque plot correspond à la commande et au contrôle d'un appareil.

Quatre conducteurs seulement sont nécessaires pour relier le poste de commande aux différents postes commandés, la fonction de chacun de ces fils étant la suivante :

Le premier assure la rotation synchrone des distributeurs.

Le second permet d'amener dans le poste commandé le courant de commande à l'instant où les balais des distributeurs se trouvent sur le plot correspondant au disjoncteur à manœuvrer.

Le troisième sert à faire passer dans le poste de commande le courant de contrôle correspondant au changement de position du disjoncteur.

Le quatrième fil sert de retour commun aux 3 circuits de synchronisation, de commande et de contrôle.

Description du tableau de commande (voir fig. 11).

Le tableau de commande des disjoncteurs de 1re catégorie d'une zone est placé dans la sous-station contrôlant cette zone. Il comprend un panneau vertical de signalisation et une table légèrement inclinée portant les manettes de commande et de contrôle des disjoncteurs à raison de deux par appareil : une manette produisant la manœuvre proprement dite, l'autre assurant le contrôle.

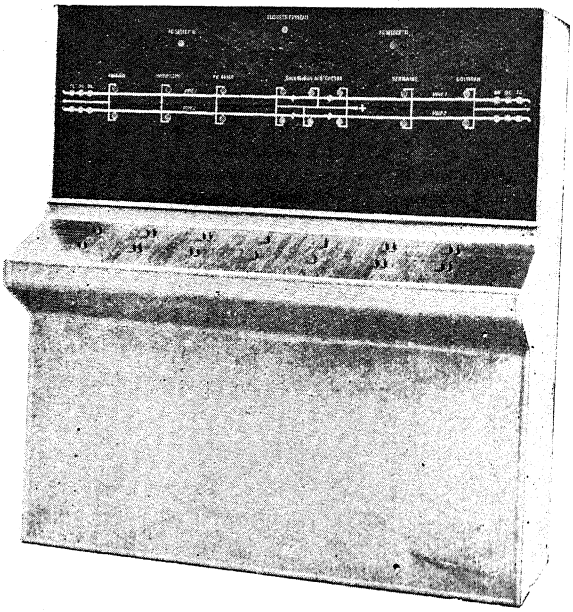


Fig. 11.

Le panneau de signalisation reproduit le schéma complet des circuits à 1 500 V de la zone. Les emplacements des disjoncteurs de sectionnement de mise en parallèle et d'alimentation sont indiqués par un transparent circulaire. Chacun de ces transparents est éclairé en rouge ou en blanc, suivant que le disjoncteur est fermé ou ouvert. Le fonctionnement d'une sonnerie d'alarme et le scintillement des feux rouges ou blancs, indiquent qu'un disjoncteur vient de changer de position; les feux ne redeviennent fixes et la sonnerie ne s'arrête que lorsque l'électricien de la sous-station a marqué la réception de l'avis de manœuvre du disjoncteur en agissant sur la manette de contrôle correspondante.

Il existe, de plus, sur le pupitre de commande, une manette supplémentaire à deux positions par disjoncteur d'alimentation de voie

principale. Cette manette dite « clef de déclenchement général de la voie » permet d'obtenir le déclenchement simultané du disjoncteur de feeder et de tous les disjoncteurs de sectionnement et de mise en parallèle d'une voie. Le réenclenchement du disjoncteur d'alimentation qui doit être opéré du tableau général de la sous-station est impossible tant que cette clef reste dans la position correspondant au déclenchement.

La position de chacun des disjoncteurs d'alimentation est répétée sur le panneau de signalisation par l'allumage de feux rouges ou blancs.

Un certain nombre d'incidents (rupture des circuits de commande à distance, fusion de fusibles du bâti d'organes) sont signalés sur le panneau par l'allumage de lampes spéciales.

Enclenchements électriques entre les différents disjoncteurs d'une voie. — Déclenchement à distance de ces disjoncteurs.

Les enclenchements de sécurité permettant l'isolement de la portion de ligne de contact d'une voie située dans un secteur dans les différents cas rappelés ci-dessous :

1° Déclenchement automatique d'un disjoncteur de sectionnement ou de mise en parallèle de la voie ;

2° Déclenchement automatique ou commandé du disjoncteur d'alimentation de la voie ;

sont réalisés à l'aide de circuits spéciaux agissant sur un certain nombre de relais appropriés, déterminant l'ouverture de tous les disjoncteurs du secteur correspondant à la voie.

L'ensemble de ces circuits et de ces relais constitue le « système de déclenchement général ». Les circuits spéciaux sont constitués par un fil par voie (fil de déclenchement général) et un retour commun (1).

Les fils de déclenchement général sont reliés à la sous-station au pôle positif d'une batterie d'accumulateurs et dans le poste de sectionnement au conducteur de retour.

A chaque disjoncteur d'une voie d'un secteur (alimentation, mise en parallèle, sectionnement), correspond un relais dont l'ouverture des contacts entraîne la coupure du circuit de maintien du disjoncteur et par conséquent son déclenchement ; les enroulements de ces relais

---

(1) Le conducteur de retour des circuits de commande à distance est utilisé comme retour des circuits de déclenchement général.

sont montés en série sur le fil de déclenchement général correspondant (voir fig. 12).

Lorsqu'un disjoncteur de mise en parallèle ou de sectionnement déclenche automatiquement, une résistance est insérée dans le circuit de déclenchement général et provoque l'ouverture de tous les relais intermédiaires alimentés par ce circuit, ce qui entraîne le déclenchement du disjoncteur de feeder et des autres disjoncteurs de mise en parallèle ou de sectionnement.

Lorsqu'un disjoncteur d'alimentation déclenche automatiquement

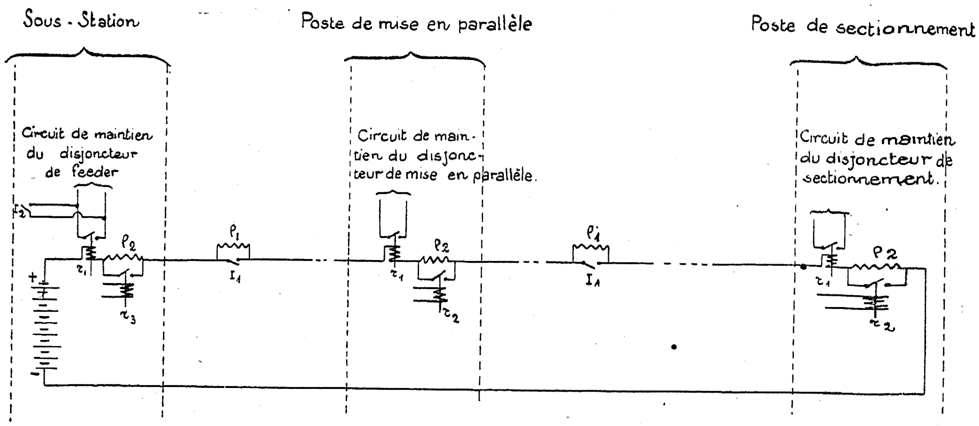


Fig. 12. — I_1, interrupteur de déclenchement général; I_2, interrupteur mettant hors service le système de déclenchement général; ρ_1, résistance intercalée par suite de l'ouverture de l'interrupteur de déclenchement général; ρ_2, résistance intercalée par suite du déclenchement des disjoncteurs; r_1, relais en série sur le circuit de déclenchement général; r_2, relais s'ouvrant quand le disjoncteur déclenche automatiquement; r_3, relais s'ouvrant quand le disjoncteur du feeder déclenche.

ou par suite d'une commande, une résistance est également insérée dans le circuit de déclenchement général et provoque de la même façon de déclenchement des disjoncteurs de sectionnement et de mise en parallèle de la voie.

C'est par l'intermédiaire du système décrit ci-dessus que la manœuvre de la clef de déclenchement général montée sur le pupitre de commande à distance provoque le déclenchement simultané des disjoncteurs d'une voie.

Après un déclenchement automatique, il faut, avant de réenclencher, mettre un instant la clef de déclenchement général dans la position « déclenché ». Cette manœuvre élimine les résistances insérées dans le circuit et permet le réenclenchement.

Des coffrets permettant le déclenchement à distance en cas d'accident sont répartis le long des voies tous les 300 m environ à raison de

un par voie pour les lignes à deux voies et de un par groupe de 2 voies pour les lignes à 4 voies.

Ces coffrets contiennent chacun une résistance de 30 000 ohms par voie normalement court-circuitée par un interrupteur (voir fig. 12).

L'ouverture de l'interrupteur met en circuit la résistance et provoque ainsi l'isolement instantané de la portion de ligne de contact située dans le secteur par déclenchement simultané des disjoncteurs d'alimentation, de sectionnement et de mise en parallèle.

Les coffrets de déclenchement contiennent également un réceptacle permettant de brancher au moyen d'un jack un appareil téléphonique

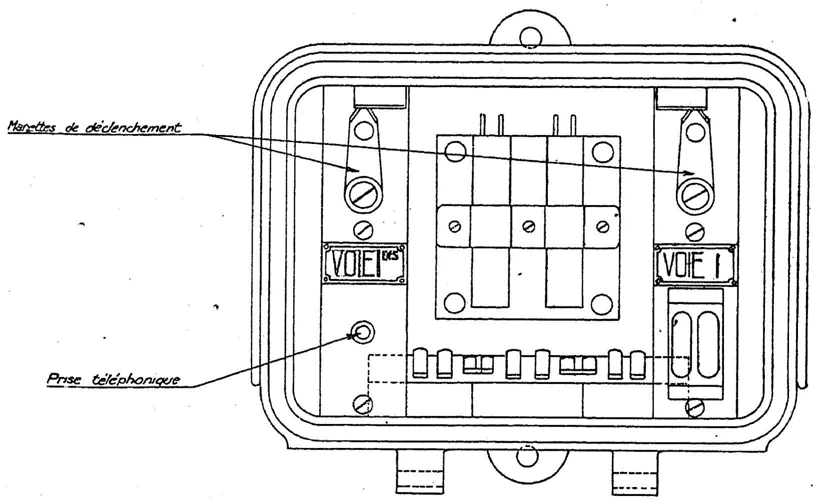


Fig. 13. — Coffret de déclenchement 2 voies.

portatif sur une ligne téléphonique omnibus reliant à la sous-station tous les postes de sectionnement et de mise en parallèle d'une même zone (fig. 13).

Chaque coffret porte extérieurement un numéro de la même parité que celle des voies auxquelles il est affecté.

Les déclenchements généraux produits, soit par le déclenchement automatique d'un disjoncteur, soit par la manœuvre d'un interrupteur de coffret, soit par la rupture d'un fil de déclenchement général, sont différenciés par une signalisation spéciale au pupitre de commande.

A chaque voie correspond sur le panneau de signalisation un ensemble de 3 lampes blanches repérées DA, DC et FC. L'allumage de la première indique que le déclenchement général a été causé par le déclenchement automatique d'un disjoncteur, celui de la seconde que le

déclenchement a été causé par l'ouverture d'un interrupeur de coffret, celui de la troisième que le déclenchement a été causé par la rupture du fil de déclenchement général.

Dispositif de secours du système de commande à distance.

Un dispositif de secours permet d'effectuer de la sous-station la commande des disjoncteurs de 1re catégorie dans le cas d'avarie du système de commande à distance par sélecteurs

Les organes de secours sont installés dans les postes de sectionnement et de mise en parallèle. Sur leur bâti sont montées des clefs correspondant chacune à un disjoncteur du poste ; ces clefs sont à trois positions :

— Une des positions correspond à la commande du disjoncteur par le dispositif normal ;

— la seconde à l'isolement du disjoncteur ;

— la troisième à la commande du disjoncteur par dispositif de secours.

Lorsqu'une des clefs spéciales ci-dessus mentionnées est placée dans la position correspondant à la commande du disjoncteur par dispositif de secours, le disjoncteur est rendu solidaire de l'enclenchement et du déclenchement d'un disjoncteur de feeder de la sous-station.

Dans ces conditions, pour enclencher et déclencher le disjoncteur, il suffit d'enclencher et de déclencher le disjoncteur de feeder correspondant. La signalisation individuelle du disjoncteur ne fonctionne plus.

Les disjoncteurs commandés par le dispositif de secours peuvent être déclenchés à distance par la manœuvre des interrupteurs des coffrets de coupure.

Ce sont les fils de déclenchement général qui constituent les circuits de commande à distance par dispositif de secours.

B. — *Disjoncteurs de 2e catégorie :* Ils alimentent par l'intermédiaire de la barre omnibus des postes de mise en parallèle, les faisceaux et voies accessoires de gare. Ces disjoncteurs sont enclenchés et déclenchés à distance par les agents des postes d'aiguillage.

Les bobines d'enclenchement des disjoncteurs de 2e catégorie sont toutes branchées sur la barre omnibus des postes.

Ligne Etampes-Vierzon.

Les schémas relatifs au sectionnement, à la mise en parallèle et à l'alimentation des lignes de contact entre Etampes et Vierzon ont été

établis sur les mêmes bases que ceux des lignes de la région parisienne.

Les disjoncteurs de mise en parallèle et de sectionnement des voies principales et les disjoncteurs d'alimentation des voies de circulation ne sont plus commandés des sous-stations, mais sont manœuvrés des gares ou postes sémaphoriques voisins, ainsi que cela a été réalisé sur Paris-Etampes pour les disjoncteurs alimentant les voies accessoires.

D'autre part, il n'existe plus de circuits de déclenchement général

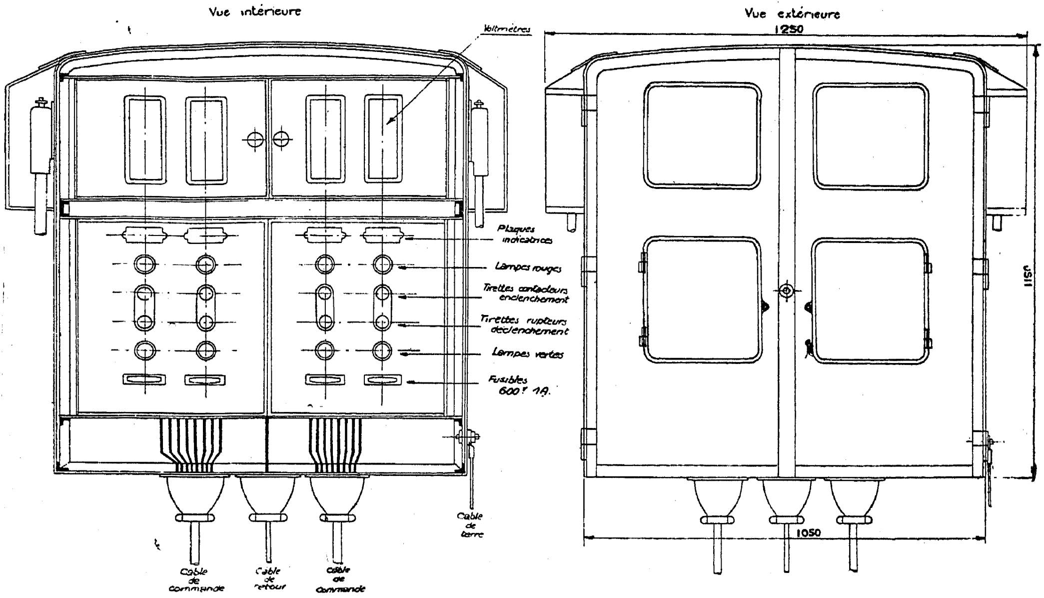


Fig. 14. — Sectionnement et mise en parallèle des lignes de contact entre Etampes et Vierzon.
Armoire contenant le tableau de commande à distance de 4 disjoncteurs de mise en parallèle.

le long des voies principales et la coupure de courant ne peut être obtenue qu'en la demandant téléphoniquement à la sous-station alimentant le secteur. A cet effet, il existe le long des voies principales des prises téléphoniques espacées de 300 m environ permettant le branchement des appareils portatifs prévus sur les locomotives.

Les bobines de maintien des disjoncteurs sont alimentées à 600 V et les bobines d'enclenchement à 1 500 V par l'intermédiaire de contacteurs 600 V dans les mêmes conditions que dans la région parisienne.

Les tableaux de commande des disjoncteurs situés dans les gares des Aubrais-Orléans et de Vierzon sont placés dans les postes d'aiguillage les plus rapprochés des cabines.

Les tableaux de commande des disjoncteurs situés dans les autres gares ou à proximité des postes sémaphoriques en pleine voie, sont abrités dans des armoires métalliques étanches placées sur le quai de la gare ou à proximité du poste sémaphorique (fig. 14).

Dans le battant des portes de ces armoires, il a été prévu un guichet vitré s'ouvrant à l'extérieur à l'aide d'une clef carrée.

Ce guichet permet, d'une part, l'observation des lampes de signalisation, d'autre part la manœuvre des tirettes d'enclenchement et de déclenchement sans avoir à ouvrir la porte de l'armoire.

Chaque chef de gare ou sémaphoriste possède une clef permettant l'ouverture du guichet.

Pour avoir accès aux connexions, il faut ouvrir la porte de l'armoire.

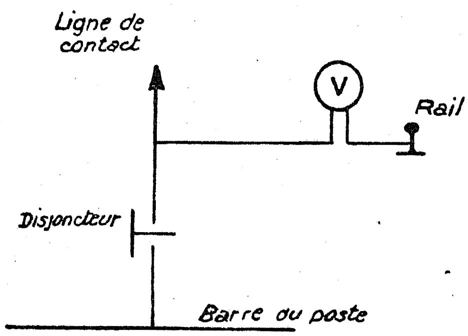


Fig. 15.

L'ouverture de cette porte se fait à l'aide d'une clef différente de celle des guichets. Seuls, les agents chargés de l'entretien ont qualité pour ouvrir les portes de l'armoire.

Outre les appareils ci-dessus indiqués, il est prévu au-dessus des organes de commande de chaque disjoncteur branché sur une voie dont la mise sous tension est opérée normalement par un autre disjoncteur, un voltmètre 1 500 V. Le branchement de ce voltmètre est réalisé conformément au schéma n° 15.

Ceci est le cas pour tous les disjoncteurs de sectionnement et de mise en parallèle des voies principales.

Le changement de position des disjoncteurs dont le déclenchement peut entraîner la coupure du courant sur une ligne de contact, est signalé aux agents chargés de leur manœuvre par une sonnerie d'alarme dont le timbre est placé, soit à proximité du tableau de commande (postes des gares des Aubrais, de Vierzon) soit dans la gare ou le poste sémaphorique (postes dont les tableaux de commande sont placés dans des armoires métalliques).

Bien que les disjoncteurs de sectionnement et de mise en parallèle ne puissent être manœuvrés individuellement des sous-stations, celles-ci cependant ont la faculté de faire déclencher tous les disjoncteurs d'un secteur en coupant momentanément le courant sur la ligne 600 V, alimentant les bobines de maintien de ces disjoncteurs (fig. 16).

Lorsque par suite d'un incident sur une ligne de contact la coupure de l'alimentation correspondante est demandée à la sous-station, celle-ci, après avoir ouvert le disjoncteur de feeder de la voie avariée, coupe momentanément l'alimentation 600 V du secteur et de ce fait isole le tronçon défectueux en déterminant l'ouverture de tous les disjoncteurs de mise en parallèle et de sectionnement correspondants.

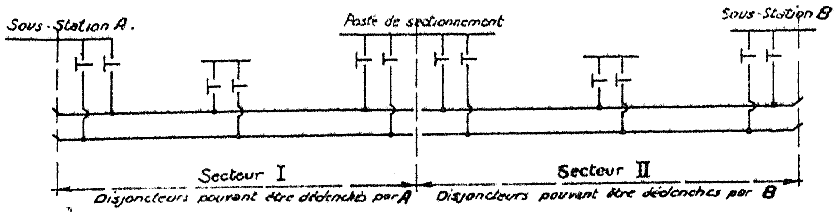


Fig. 16.

L'élimination de la ligne avancée étant effectuée et le 600 V rétabli par la sous-station, les lignes restant sous tension seront indiquées par les voltmètres situés au-dessus des tirettes des disjoncteurs.

Les agents des gares ou postes sémaphoriques réenclenchent alors immédiatement les disjoncteurs correspondant aux voies remises sous tension et ceux-là seulement.

III. — Conditions d'utilisation des installations assurant l'alimentation, le sectionnement et la mise en parallèle des lignes de contact.

Les installations qui viennent d'être décrites sont utilisés dans les conditions suivantes par les agents des divers services.

Le dispatcher ou Régulateur de Section qui contrôle la circulation des trains, contrôle également les conditions d'alimentation des voies principales. Il accorde les coupures de courant pour entretien et travaux ; en cas d'incident intéressant des lignes, il prend toutes les mesures qu'il juge nécessaires pour localiser les tronçons avariés et arrête d'accord avec les services intéressés les conditions dans lesquelles seront effectués les travaux de remise en état.

Les électriciens des sous-stations veillent au maintien sous tension des lignes de contact de leur zone. Dans le cas de déclenchement des disjoncteurs d'alimentation, ils procèdent à 3 tentatives de réenclenchement successives ; en cas d'insuccès, ils considèrent la ligne de contact comme défectueuse et la signalent comme telle au régulateur de section.

Ils effectuent les manœuvres correspondant à la coupure et au rétablissement du courant et adressent au demandeur les confirmations nécessaires.

Ils prennent toutes mesures utiles pour éviter qu'un secteur sur lequel le courant ne peut être maintenu ou a été supprimé volontairement, soit remis sous tension par le passage d'une machine électrique, pantographe levé, sous un des sectionnements encadrant le secteur. Dans ce but est affecté à chaque sectionnement automatique, une gare ou un poste de couverture qui peut, en manœuvrant des signaux appropriés, interdire l'entrée du secteur isolé à toute machine électrique circulant pantographe levé.

La manœuvre de ces signaux (couverture du secteur) est effectuée sur la demande de la sous-station alimentant normalement le secteur isolé. A cet effet, chaque sous-station est reliée téléphoniquement aux gares ou postes de couvertures de sa zone.

Les agents du Service de la Voie chargés de l'entretien des lignes, exécutent eux-mêmes, d'accord avec le Régulateur de Section, les manœuvres de sectionneurs nécessaires à leur sécurité après avoir obtenu de la sous-station intéressée confirmation de la coupure de courant.

En principe, un chantier est protégé contre une remise sous tension intempestive par l'ouverture des sectionneurs l'encadrant. Ces sectionneurs, munis de talons de mise à la terre, mettent dans leur position d'ouverture la ligne de contact au rail. Ces mesures de sécurité sont d'ailleurs complétées par une mise au rail de la ligne effectuée au point même où se trouve l'équipe. Pour les travaux de courte durée, la coupure du courant reste étendue à l'ensemble du secteur et les équipes ne sont protégées que par la mise au rail effectuée au point de travail.

Certains travaux d'entretien s'effectuent sous tension ; la nature de ces travaux, ainsi que les conditions dans lesquelles ils doivent être exécutés sont précisées très nettement dans une consigne spéciale.

Les agents des gares sont chargés sous la responsabilité de leur chef de service de la manœuvre des appareils, disjoncteurs ou sectionneurs correspondant à l'alimentation des voies de la gare.

Ils doivent de plus manœuvrer les sectionneurs intéressant les lignes de contact de voies principales conformément aux ordres qui peuvent leur être donnés par le Régulateur de Section.

Entre Etampes et Vierzon, ils sont chargés du réenclenchement des disjoncteurs de sectionnement et de mise en parallèle des voies principales.

IV. — Résultats d'exploitation.

Le système réalisé tel qu'il a été décrit s'est montré tout à fait efficace. La localisation et l'élimination d'un tronçon de ligne de contact avarié, s'effectue rapidement malgré les mises en parallèle existant entre lignes de contact de différentes voies.

Des essais effectués sur la section à 4 voies entre Paris et Etampes ont mis en évidence qu'avec un réglage judicieux de l'intensité de déclenchement des disjoncteurs d'alimentation de mise en parallèle et de sectionnement, le tronçon de ligne de contact compris entre une sous-station et le poste de sectionnement automatique contigu était éliminé automatiquement en cas de défaut en un temps inférieur à 15 centièmes de seconde et sans apporter aucune perturbation dans l'alimentation des lignes de contact saines.

En ce qui concerne la localisation plus poussée des défauts nécessitant la manœuvre de sectionneurs par les agents des gares, de très bons résultats ont été obtenus lorsque l'entraînement du personnel a été suffisant.

A ce sujet, il convient de mentionner les mesures spéciales qui ont été prises pour former rapidement le personnel des gares au nouveau rôle qu'il avait à remplir du fait de l'électrification. Une équipe constituée par des agents supérieurs des Services de la Traction, de l'Exploitation et de la Voie particulièrement au courant des installations a pour mission de créer inopinément, soit dans les gares, soit en pleine voie des situations anormales nécessitant l'intervention des agents à instruire. Les conditions dans lesquelles les manœuvres sont effectuées sont soigneusement notées puis les observations nécessaires sont adressées aux exécutants.

Cette équipe dite des incidents fictifs a permis d'obtenir en très peu de temps des résultats remarquables.

Les exercices d'instruction et les conférences qui les complètent familiarisent les agents avec la manœuvre des appareils et leur facilitent la compréhension des consignes forcément assez complexes qui règlent l'exploitation avec traction électrique.

Si au début de la mise en service des installations, les conséquences de certains incidents ont été aggravées par suite de l'hésitation des agents, de récents exemples ont montré que le personnel des gares est maintenant tout à fait formé aux nouvelles fonctions qui lui incombent.

V. — Dispositions prévues dans le cas du prolongement de l'électrification.

Etant donné les résultats d'exploitation obtenus sur Paris-Vierzon il a été décidé de conserver le même schéma d'alimentation et de sectionnement pour les lignes de contact des voies dont l'électrification est projetée (ligne Orléans-Tours, ligne Vierzon-Brive).

Toutefois, compte tenu, d'une part des conditions d'exploitation des lignes en cause, d'autre part des récents progrès de la technique. des modifications seront vraisemblablement apportées dans la réalisation des installations.

Les postes de sectionnement automatique seront conservés mais les postes de mise en parallèle intermédiaires seront en principe supprimés. En dehors des sous-stations, la mise en parallèle des lignes de contact ne sera effectuée que dans les postes de sectionnement.

Ce n'est qu'exceptionnellement, sur certaines sections à forte rampe où il y a intérêt réaliser le plus possible la mise en parallèle entre les lignes de contact des 2 voies que l'on se réservera la possibilité d'installer des postes de mise en parallèle intermédiaires.

Etant donné d'autre part les progrès effectués dans la construction des équipements automatiques, il a été décidé de prévoir la commande entièrement automatique des disjoncteurs des postes de sectionnement.

La mise sous tension de la ligne de contact provoquera la fermeture du disjoncteur de sectionnement correspondant et le déclenchement du disjoncteur d'alimentation placé à la sous-station le déclenchement de ce disjoncteur.

Le schéma de principe du système est indiqué ci-dessous (fig. 17).

L'asservissement du disjoncteur de sectionnement et du disjoncteur de feeder d'une voie sera assuré par l'intermédiaire d'un seul fil de faible section isolé pour 1 500 V.

La distribution auxiliaire 600 V pour l'alimentation des bobines de maintien des disjoncteurs se justifie entre Paris et Vierzon par le grand nombre de disjoncteurs d'alimentation manœuvrés par les agents des gares ; cette distribution effectuée à une tension de 1^re^ catégorie per-

met en effet d'alimenter les circuits de contrôle et de signalisation des disjoncteurs. La commande des disjonceturs de sectionnement devenant entièrement automatique cette distribution auxiliaire n'est plus indispensable et il est beaucoup plus économique d'assurer l'alimen-

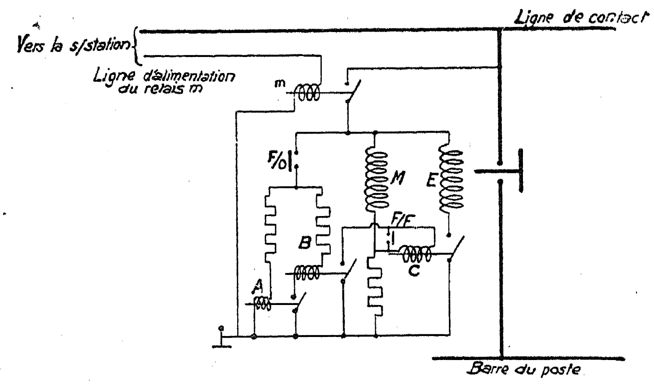


Fig. 17. — F/o, F/F, interlocks portés par le disjoncteur ; A, relais temporisé ; B, relais fermant le circuit du contacteur de fermeture ; C, contacteur de fermeture ; M, bobine de maintien ; E, bobine d'enclenchement ; *m*, relais auxiliaire déterminant le déclenchement du disjoncteur de sectionnement dans le cas du déclenchement du disjoncteur du feeder.

tation de la bobine de maintien des disjoncteurs sous 1 500 Volts par la ligne de contact.

Ce mode d'alimentation présente de plus l'avantage de faciliter la sélection automatique des défauts.

Considérons en effet le schéma type de sectionnement réalisé entre deux sous-stations.

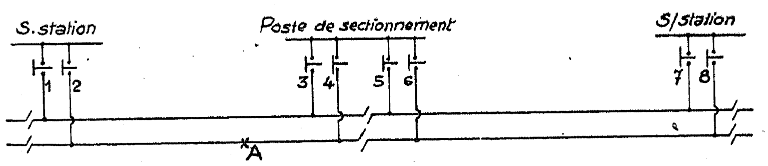


Fig. 18.

Pour que la ligne de contact avariée en A soit éliminée sans qu'il se produise de perturbation dans l'alimentation des autres lignes, il est nécessaire que le disjoncteur de sectionnement correspondant (1) déclenche plus rapidement que les disjoncteurs d'alimentation (1) et (2). Cette condition sera réalisée facilement, en conservant pour les dis-

joncteurs de sous-station l'alimentation des bobines de maintien sous tension fixée, et en alimentant à 1 500 V par la ligne de contact les bobines de maintien des disjoncteurs des postes de sectionnement. La chute de tension consécutive au défaut a pour effet de diminuer le flux de maintien et d'accroître automatiquement la rapidité de déclenchement du disjoncteur de sectionnement.

LES SOUS-STATIONS AUTOMATIQUES
E TRACTION DE LA COMPAGNIE D'ORLÉANS [1]

par M. Barillot,

Ingénieur-Chef du Service électrique
de la Compagnie du Chemin de fer de Paris-Orléans

---

ts de l'automaticité. — Sous-station d'essai de Tivernon : équipement automatique des commutatrices ; des départs 1 500 V ; des services auxiliaires — Equipements en réalisation ou en projet. Problèmes spéciaux posés par l'équipement automatique d'une ligne complète.

Les sous-stations des lignes Paris-Vierzon, Brétigny-Dourdan que la ›mpagnie d'Orléans a électrifiées en première étape, ont toutes été évues à l'origine à commande entièrement manuelle, car à l'époque ı ont été effectuées les études, l'appareillage automatique n'offrait s encore toutes les garanties de sécurité compatibles avec l'exploition de lignes aussi importantes.

Depuis, l'expérience acquise dans l'exploitation des installations aumatiques a mis en évidence que les équipements de contrôle étaient rtis de la période de mise au point et qu'ils présentaient une sécuté de fonctionnement égale, sinon supérieure, à la commande maıelle.

D'autre part, l'augmentation constante des salaires grève d'une ıarge de plus en plus considérable l'exploitation des sous-stations ›nt l'effectif, compte tenu des obligations imposées par la législaon actuelle, ne peut être réduit à moins de 7 agents par établisseıent. Seule, l'adoption du contrôle automatique de tout ou partie des ıstallations est de nature à permettre une réduction du personnel et réaliser de ce fait des économies importantes.

Cette réduction du personnel permet de plus de résoudre plus facileıent la question du logement des agents, question soulevée par l'emlacement de certaines sous-stations qu'il est rarement possible de préoir à proximité immédiate d'agglomérations importantes.

Enfin, l'automaticité réduit à un nombre minime les manœuvres

---

(1) Ce rapport sera discuté à la Semaine de discussions de Novembre 1931.

exigeant une intervention directe des agents de conduite et accroît très notablement la sécurité du personnel.

Ces considérations ont conduit la Compagnie d'Orléans à étudier et à réaliser un équipement automatique d'essai qui, le cas échéant, serait étendu aux installations existantes et aux sous-stations des lignes à électrifier.

La sous-station de Tivernon, située dans la Beauce entre Toury et Artenay fut choisie pour l'essai, car des conditions de logement et de ravitaillement des électriciens de cette sous-station, assez éloignée des centres habités, étaient particulièrement défavorables.

L'étude du programme à réaliser fit d'abord ressortir qu'il n'était pas possible de prévoir le contrôle entièrement automatique de la sous-station et de supprimer complètement le personnel de conduite.

Les conditions de sécurité tout à fait spéciales dans lesquelles doit être assurée l'alimentation du réseau de traction sur des lignes de l'importance de celle de Paris à Vierzon, ont conduit à prévoir un sectionnement très poussé des lignes H. T. alimentant les sous-stations et des lignes de contact distribuant le courant 1 500 V aux locomotives.

De cette façon, les portions de lignes immobilisées, soit à la suite d'incident, soit pour permettre l'exécution des travaux, sont réduites au minimum.

La manœuvre des appareils (sectionneurs et disjoncteurs) nécessaires à l'isolement d'une portion de ligne H. T. ou de ligne de contact, est effectuée à la demande des équipes d'entretien par les agents des sous-stations. Ceux-ci ont également un rôle à remplir dans le cas de la recherche et de la localisation des défauts sur ces lignes.

Supprimer le personnel d'une sous-station revenait donc à supprimer les possibilités de sectionnement des lignes de contact et des lignes haute tension au droit de cette sous-station et, dans ces conditions, à augmenter les répercussions d'une mise hors circuit de ligne en cas d'incident ou de travaux.

Si cette sujétion peut être facilement acceptée pour les lignes à faible trafic où les intervalles disponibles entre les passages de trains sont nombreux, elle est inadmissible pour les lignes à trafic important, pour lesquelles la continuité de la fourniture du courant de traction est primordiale.

Il fut donc décidé de conserver en permanence, dans la sous-station, un agent qui effectuerait le cas échéant, les manœuvres nécessaires sur les appareils correspondant aux lignes H. T. ou aux départs à courant

continu 1 500 V. Cet agent n'exerçant normalement que des fonctions de surveillance, son temps de présence peut être augmenté, ce qui permet de réduire le personnel de la sous-station à 3 agents : deux électriciens prenant le service tour à tour, un sous-chef électricien ayant en charge l'entretien de l'équipement de la sous-station et assurant le remplacement des électriciens.

Description de l'équipement de la sous-station de Tivernon

La sous-station de Tivernon, dont le schéma est indiqué ci-contre est, branchée en dérivation sur les deux lignes 90 kV qui desservent

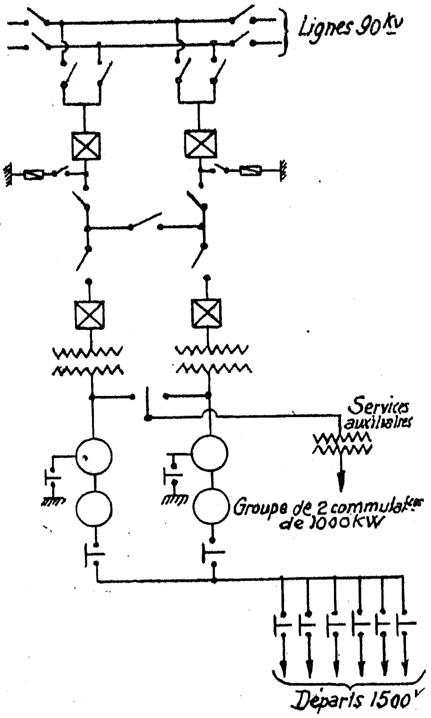


Fig. 1.

l'ensemble des sous-stations de la ligne Paris-Vierzon et qui sont raccordées, d'une part au réseau 60 kV de l'Union d'Electricité poste Chevilly) et, d'autre part à l'Usine d'Eguzon.

Elle comporte deux groupes de 2 commutatrices de chacune 1 000 kW. Chacun de ces groupes est relié à la barre 90 kV de la sous-station par un transformateur de 2 100 kVA, 90 kV — 2 × 555 V.

Sur la barre 1 500 V de la sous-station sont branchés 6 départs équipés chacun avec des disjoncteurs ultra-rapides.

Les services auxiliaires sont alimentés par un transformateur spécial hexaphasé 555 V, triphasé 215-125 V, branché sur la basse tension de l'un ou l'autre des transformateurs de commutatrice.

Une batterie d'accumulateurs assure l'alimentation des circuits de commande et de contrôle des appareils.

La commande manuelle a été conservée sans changement pour les appareils correspondant au branchement de la sous-station sur les lignes haute tension, ainsi que pour les interrupteurs 90 kV des transformateurs de commutatrices.

L'équipement automatique a été appliqué au contrôle de groupes depuis et y compris les contacteurs de démarrage côté alternatif BT et au contrôle des départs continu 1 500 V.

L'installation étant réalisée à titre d'essai, on s'est réservé la possibilité d'effectuer manuellement les manœuvres en cas d'avarie de l'équipement automatique. A cet effet, les tableaux primitifs ont été conservés et le passage du fonctionnement automatique au fonctionnement manuel se fait très facilement par une simple manœuvre d'inverseurs.

Les conditions du fonctionnement réalisées avec l'équipement automatique sont indiquées ci-après :

Groupes commutatrices

La sous-station étant arrêtée, la mise en route d'un groupe est déterminée par baisse de tension sur la barre positive de la sous-station ; la mise en service du second groupe s'effectue automatiquement en cas de surcharge ou d'avarie du premier groupe. L'ordre de priorité des groupes est déterminé volontairement par la manœuvre d'un inverseur.

Les différentes phases de la mise en route d'un groupe sont les suivantes :

Alimentation à demi-tension de la machine côté terre du groupe, puis, au bout d'un temps déterminé, alimentation à demi tension de la machine côté ligne.

Contrôle de l'arrivée au synchronisme de chacune des machines d'un groupe.

Fixation de la polarité des inducteurs de chaque machine par la batterie d'accumulateurs de la sous-station.

Auto-excitation de chaque machine dès que la polarité convenable est obtenue.

Alimentation des machines sous la pleine tension alternative.

Abaissement des balais sur le collecteur.

Fermeture successive, après temporisation, des deux disjoncteurs du groupe.

L'arrêt d'un groupe s'effectue, soit par suite de manque de charge, si la valeur de l'intensité débitée reste pendant un temps donné au-dessous d'une certaine limite, soit par suite des conditions anormales de fonctionnement.

Les phases de l'arrêt sont les suivantes :

Ouverture des disjoncteurs et des contacteurs de groupe.

Retour de l'appareillage à la position de repos.

Relevage des balais de chaque machine.

Après un arrêt déterminé par le manque de charge, le groupe est prêt pour une nouvelle mise en route.

Lorsque l'arrêt a été causé par un dérangement, deux cas sont à considérer :

1° L'arrêt est consécutif au fonctionnement de la protection contre les conditions anormales suivantes :

baisse ou manque de courant haute tension ;

retour de courant ;

échauffement des machines ;

surcharge côté continu.

Le groupe se remet automatiquement en marche dès suppression de la cause qui a motivé l'arrêt.

2° La mise hors service est effectuée à la suite des conditions anormales suivantes :

phases non équilibrées ;

surcharge alternative ;

trop grande durée de mise en route ;

échauffement du transformateur ;

échauffement des paliers ;

mise à la terre ;

excès de vitesse.

Ces causes d'arrêt nécessitant une inspection du groupe, celui-ci ne peut se remettre en service qu'après intervention du personnel de la sous-station.

Départs 1 500 *V.*

La fermeture des disjoncteurs de feeder s'effectue automatiquement.

Dans le cas d'un déclenchement par surcharge, la ligne est isolée automatiquement par suite de la coupure momentanée du circuit alimentant les électros de maintien des disjoncteurs de sectionnement et de mise en parallèle. La résistance de la ligne est mesurée et si celle-ci reste supérieure à une valeur donnée, le disjoncteur se réenclenche automatiquement.

Dans le cas d'une surcharge temporaire insuffisante pour actionner le déclenchement du disjoncteur, mais assez importante pour produire un échauffement pouvant déterminer le recuit des lignes de contact, le départ est éliminé provisoirement, il est remis en service dès que la température des circuits s'abaisse au-dessous d'une valeur donnée.

Services auxiliaires et divers

Un disjoncteur à minimum de tension coupe automatiquement les départs BT force motrice des services auxiliaires dans le cas d'une baisse de courant ou d'un manque de courant HT. Une sonnerie placée dans chacune des maisons d'habitation des électriciens de la sous-station avertit les agents des circonstances anormales suivantes :

Déclenchement des disjoncteurs HT.

Déclenchement du disjoncteur des services auxiliaires.

Baisse de tension de la batterie d'accumulateur.

Manque de tension sur les départs 600 V (alimentation des électros de maintien des disjoncteurs de sectionnement et de mise en parallèle).

Fonctionnement des protections éliminant un groupe.

Déclenchement des disjoncteurs de feeder.

Un tableau de signalisation avec interrupteurs pour l'arrêt de la sonnerie, placé dans la salle des machines de la sous-station, permet une localisation rapide du dérangement signalé.

Résultats d'exploitation

L'équipement automatique de la sous-station de Tivernon a été mis en service à la fin de l'année 1929. Cet équipement, particulièrement complexe du fait qu'il assure le démarrage et le couplage de deux commutatrices en série, n'a donné lieu, depuis cette époque, à aucune critique et son fonctionnement a été parfaitement régulier.

Le réglage de la tension de mise en route et de la temporisation cor-

respondante a été déterminé en s'attachant à conserver, dans tous les cas, une tension suffisante sur les lignes de contact, tout en évitant des mises en route trop fréquentes de la sous-station.

Des résultats très satisfaisants ont été obtenus après quelques tâtonnements. La tension au pantographe des machines ne descend jamais, dans la zone de la sous-station au-dessous de 1 200 V, cette valeur étant d'ailleurs atteinte exceptionnellement et seulement pendant le temps correspondant à la temporisation du relais de mise en route et au démarrage du groupe, soit pendant 1 minute 1/2 au maximum. Dans ces conditions, les chutes de tension inévitables du fait du fonctionnement automatique n'ont eu aucune répercussion dans la régularité de la marche des trains. D'autre part, les surélévations brusques de tension, qui se produisent au moment du branchement de la sous-station sur les lignes, sont limitées à 300 V et n'ont causé, jusqu'à présent, aucune avarie aux équipements de locomotive.

La durée moyenne journalière d'arrêt des machines est de 6 heures environ.

Résultats économiques

Bien que, par précaution, on ait maintenu en première étape 4 agents de la sous-station, l'économie résultant de la réduction de personnel permet d'amortir, en 4 ans environ, l'installation de l'équipement automatique. C'est dire l'intérêt considérable que présente l'opération.

En ce qui concerne les dépenses d'entretien, l'installation est en service depuis trop peu de temps pour que l'on puisse dès maintenant tirer des conclusions définitives. Il paraît toutefois établi que les frais supplémentaires correspondant à l'équipement automatique seront minimes et largement compensés par la réduction des dépenses afférentes au reste de l'installation et, en particulier, aux machines du fait de la suppression complète des fausses manœuvres.

Cet accroissement de la sécurité n'est d'ailleurs pas un des moindres avantages de l'automaticité.

Pour ce qui est du rendement, il y a lieu de noter que le rendement moyen de la sous-station de Tivernon était déjà de l'ordre de 91 pour cent avant la mise en service de l'équipement automatique.

Cette valeur élevée tenait à l'importance du trafic de la ligne, à peu près régulièrement réparti sur l'ensemble de la journée, sans heures creuses caractérisées.

L'automaticité ne pouvait donc accroître ce rendement dans de grandes proportions.

On a constaté, cependant, qu'il est maintenant de l'ordre de 92 pour cent et que celui des deux sous-stations encadrant Tivernon a également augmenté légèrement. L'augmentation du rendement de ces dernières sous-station s'explique du fait que leur charge moyenne est plus élevée par suite des arrêts de la sous-station automatique.

Le rendement de Tivernon pourrait d'ailleurs être encore amélioré si l'on rendait automatiques les disjoncteurs H. T. des transformateurs ; on éliminerait ainsi les pertes à vide de ces appareils pendant les périodes d'arrêt.

On peut estimer à 2 pour cent environ le gain que procurerait l'automaticité intégrale et comme le débit annuel est de l'ordre de 8 millions de kWh, l'économie ressortirait à 160 000 kWh.

A signaler, d'ailleurs que si l'automaticité avait été appliquée à l'une des sous-stations de Sologne dont le rendement moyen est seulement de l'ordre de 88 pour cent, le gain serait beaucoup plus appréciable et atteindrait 4 points.

Comme le débit est de 6 millions de kWh, l'économie ressortirait à 240 000 kWh environ.

En résumé, on peut tirer de cette expérience que le rendement moyen global d'une sous-station automatique équipée avec commutatrices est de l'ordre de 92 pour cent, chiffre extrêmement intéressant et tout a fait comparable à celui que l'on peut obtenir avec des convertisseurs à vapeur de mercure.

Equipements automatiques en cours de réalisation ou en projet

Les résultats encourageants obtenus à la sous-station de Tivernon ont engagé la Compagnie d'Orléans à poursuivre la réalisation d'installations automatiques.

Il a été décidé d'équiper automatiquement les redresseurs à vapeur de mercure qui vont remplacer, à la sous-station de Saint-Evroult, (ligne de Brétigny à Dourdan) les commutatrices qui doivent être utilisées pour le renforcement de deux sous-stations de la région parisienne.

Cette sous-station, qui ne fournit que les pointes de démarrage des trains en gare de Dourdan, est actuellement mal utilisée et l'on a pensé augmenter très sensiblement son rendement en remplaçant les commutatrices par des redresseurs et en prévoyant l'installation du contrôle automatique.

Les conditions de fonctionnement prévues pour l'équipement automatique sont les mêmes qu'à la sous-station de Tivernon, toutefois, la commande des disjoncteurs de feeder restera entièrement manuelle du fait de certaines sujétions inhérentes à l'équipement du sectionnement des lignes caténaires de cette région.

Par contre, pour augmenter le rendement de l'installation, l'automaticité sera étendue aux disjoncteurs HT des transformateurs de redresseurs. Lorsque les redresseurs seront hors service, les transformateurs seront séparés des barres H. T.

Les services auxiliaires de la sous-station seront alimentés normalement par un transformateur 90 000/225-125 branché directement sur les barres 90 kV.

De cette façon, les services auxiliaires pourront rester alimentés pendant les périodes d'arrêt des groupes.

Un transformateur branché sur la basse tension d'un des transformateurs de redresseur permettra d'assurer l'alimentation en secours des auxiliaires.

Les sous-stations devant alimenter les lignes dont l'électrification est projetée (Orléans-Tours, Vierzon-Brive) seront munies de l'équipement automatique des groupes et des feeders 1 500 V dans des conditions analogues à celles réalisées à Tivernon. Cependant, toute possibilité de commande manuelle sera supprimée et les seules manœuvres qui pourront être effectuées par les agents de la sous-station sur des groupes et les départs 1 500 V seront : le changement de l'ordre de mise en route des groupes, le démarrage et le maintien continuel en service d'un groupe, le déclenchement et le réenclenchement d'un disjoncteur de feeder 1 500 V.

La manœuvre des interrupteurs HT des groupes sera comprise dans l'équipement automatique et, de ce fait, les services auxiliaires seront alimentés par un transformateur branché sur la barre 90 kV de la sous-station.

La commande des disjoncteurs assurant le sectionnement des voies entre 2 sous-stations, conformément aux indications du schéma ci-dessous, sera également contrôlée automatiquement. La mise sous tension de la ligne déterminera l'enclenchement du disjoncteur de sectionnement correspondant et le déclenchement du disjoncteur de feeder entraînera le déclenchement du disjoncteur de sectionnement.

La transformation en sous-station automatique des 5 sous-stations manuelles existant entre Etampes et Vierzon est également envisagée.

Les conditions de fonctionnement seraient analogues à celles prévues pour les sous-stations projetées.

L'équipement d'une ligne complète avec sous-stations automatiques, soulève d'ailleurs des problèmes qui ne se posaient pas dans le

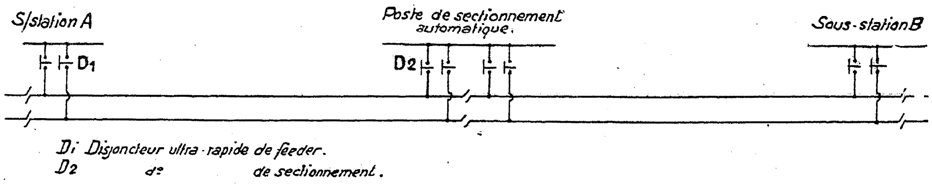


Fig. 2.

cas de sous-stations automatiques encadrées par des sous-stations manuelles.

Considérons, en effet, une ligne alimentée par 4 sous-stations A, B, C, D, munies chacune du contrôle automatique des groupes d'alimentation.

Il est nécessaire, pour obtenir un fonctionnement stable du sys-

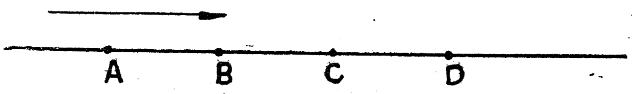


Fig. 3.

tème, que la ligne soit maintenue sous tension par une sous-station bien déterminée dans laquelle un groupe restera en permanence en service.

On choisira, pour cela, une sous-station située à proximité d'une grande gare demandant, du fait des manœuvres, une fourniture de courant ininterrompue.

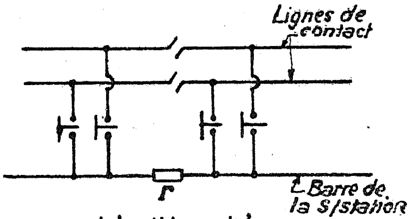
Soit A la sous-station pilote et considérons un train partant de A et se dirigeant sur D. Si ce train est seul en ligne, la tension sera la même sur les barres des sous-stations B C et D pour empêcher le démarrage simultané des 3 sous-stations, il sera nécessaire de prévoir une temporisation différente pour les relais de démarrage, cette temporisation croissant de B à D.

Dans ces conditions, la mise en route de la sous-station D ne s'effectuera qu'au bout d'un temps assez long, ce qui, dans le cas de mise en route causée par des trains situés à proximité de D, peut entraîner des chutes de tension exagérées.

Pour éviter ces inconvénients, on envisage d'adjoindre au relais de

tension un relais d'intensité branché dans les conditions indiquées sur la fig. 4 et déterminant le démarrage de la sous-station dès que le courant en ligne au droit de la sous-station dépasse une certaine valeur.

Les variations instantanées de tension peuvent être plus importantes que dans le cas d'une sous-station automatique encadrée par deux sous-stations manuelles. Des dispositifs doivent donc être prévus pour réduire l'importance de ces variations qui peuvent être préjudiciables aux moteurs et à l'équipement des locomotives.



r. relais d'intensité

Fig. 4.

On peut obtenir une élévation progressive de la tension en ligne au moment de la mise en route d'une sous-station, soit en connectant le groupe à la barre 1 500 V par l'intermédiaire de résistances qui s'éliminent graduellement, soit, dans le cas de commutatrices, en agissant sur l'excitation des machines ; l'équipement règle cette excitation de telle façon que la tension du groupe au moment du couplage ait la même valeur que la tension de la barre de la sous-station, puis l'augmente progressivement jusqu'à une valeur correspondant à la tension normale.

APPLICATION DES REDRESSEURS A LA CHARGE DES BATTERIES DE TRACTION (1)

par M. Giroz.

Généralités. — Principaux types de batteries de traction. — Méthode de charge. Charge automatique. — Principaux types de valves redresseuses. — Caractéristiques d'un redresseur pour charge de batterie. — Appendice : charge automatique à intensité constante par thyratrons.

Généralités.

La plupart des études sur les redresseurs ont eu pour objet l'examen de l'alimentation et de la construction de ces appareils, et c'est plutôt en vue de leur application à l'alimentation directe d'un réseau courant continu (force et lumière et surtout traction), qu'on a étudié leurs conditions de fonctionnement. Le développement de la petite et de la moyenne traction par accumulateurs a entraîné le développement de tout un domaine d'application des redresseurs qui était passé jusqu'à présent au second plan. Alors que les seuls redresseurs appliqués à l'alimentation directe d'un réseau courant continu étaient les redresseurs dits à vapeur de mercure, il a été possible au contraire d'appliquer une plus grande variété de redresseurs à la charge des batteries de traction. Cette étude nous donnera donc l'occasion de passer en revue les caractéristiques principales de nouvelles valves redresseuses qui n'ont été mises au point qu'au cours de ces dernières années et dont le domaine d'application paraît devoir aller en s'élargissant.

D'autre part, la méthode employée pour déterminer la spécification d'un redresseur de petite ou moyenne puissance appliqué à la charge d'une batterie de traction diffère notablement de celle employée pour calculer un redresseur de grande puissance appliqué à l'alimentation d'un réseau. Dans ce dernier cas, qui a été le plus souvent étudié par les spécialistes, on admet généralement que l'impédance du circuit d'utilisation est très élevée et l'ondulation du

(1) Ce rapport sera présenté et discuté à la Semaine de novembre de la Société française des Electriciens.

courant redressé négligeable. Cette hypothèse n'est plus admissible dans le cas des redresseurs appliqués à la charge de batterie puisque dans ce cas, l'impédance du circuit d'utilisation est négligeable et que le courant redressé peut présenter sans inconvénient une forte ondulation. Par contre, la tension redressée ne présente plus aucune ondulation et doit être égale à chaque instant, si l'on suppose la résistance interne de la batterie négligeable, à la contre-tension de la batterie. Autrement dit, la composante alternative du courant redressé est court-circuitée à travers la batterie.

Le débit étant déterminé, non plus par le quotient de la force électromotrice du redresseur par l'impédance du circuit extérieur, comme dans le cas des gros redresseurs, mais par la différence entre la force électromotrice du redresseur et la force électromotrice de la batterie, laquelle est variable, on voit que le problème du réglage de la tension d'un redresseur est, dans le cas de l'application qui nous occupe, assez délicat à résoudre.

La loi qui fixe la variation de tension d'un redresseur en fonction du débit de charge, dépendant essentiellement de la loi imposée par le constructeur de la batterie, du débit de charge en fonction de la contre-tension de cette batterie, il en résulte que la technique des redresseurs de charge de batteries doit suivre de très près les directives indiquées par les techniciens des accumulateurs. En particulier, les conditions de charge des deux grandes familles de batteries de traction, savoir les batteries au plomb (type Ironclad) et les batteries fer-nickel, étant nettement différentes, les redresseurs spécialement étudiés pour la charge des batteries de traction devront être prévus de façon à pouvoir s'adapter indifféremment à ces conditions très différentes de charges.

Principaux types de batteries de traction.

Les batteries de traction sont appliquées à l'équipement d'engins locomoteurs de types très différents tels que : chariots de gare et d'usine, tracteurs industriels, camionnettes, camions (de 3 à 5 tonnes en général), locomotives de mines et d'aciéries, locomotives de manœuvre et dans certains cas, automotrices.

Les trois dernières catégories d'appareils se rapportent à la traction sur rails (en général à voie étroite) les autres à la traction sur bandage. Il est intéressant de préciser l'ordre de grandeur des caractéristiques principales des batteries utilisées dans ces diffé-

rents modes de traction afin de se rendre compte plus exactement des caractéristiques des redresseurs destinés à leur charge.

D'une façon générale, on peut admettre que, pour la traction sur bandage (chariots, tracteurs d'atelier, camionnettes, etc...) on utilise des batteries d'une capacité comprise entre 150 et 300 A/h et comprenant un nombre d'éléments tel qu'elles soient capables de développer une tension de 30 à 50 V. Le débit de charge pour de telles batteries est compris approximativement entre 25 et 50 A.

Pour la traction sur voie étroite (locomotives de mines) on utilise des batteries d'une capacité comprise entre 500 et 900 A/h développant une tension comprise entre 50 et 100 V et exigeant un régime de charge pouvant aller de 90 à 120 A.

Il n'entre pas du tout dans nos intentions d'examiner, au cours de cette étude, les mérites respectifs des accumulateurs au plomb genre Ironclad et des accumulateurs fer-nickel. Nous nous bornerons à constater que les deux types se rencontrent à peu près aussi couramment l'un que l'autre pour les applications à la petite traction et que les constructeurs de redresseurs ne peuvent pour l'instant envisager d'étudier des appareils exclusivement destinés à l'un de ces deux types d'accumulateurs.

Les caractéristiques indiquées ci-dessus se rapportent donc aussi bien à des batteries au plomb qu'à des batteries fer-nickel toutefois, les débits de charge sont prévus, en général, pour une charge en 9 heures dans le cas des batteries type Ironclad et pour une charge en 6, 7 heures dans le cas des batteries fer-nickel.

Nous verrons cependant plus loin qu'il est possible d'utiliser également pour les batteries type Ironclad une méthode de charge dite accélérée permettant la charge en 6, 7 heures sans nuire à la batterie.

Méthodes de charge.

A) *Accumulateurs au plomb, type Ironclad.*

On peut distinguer, pour ce type d'accumulateurs, trois méthodes de charges :

1° la méthode à potentiel constant.

2° la méthode à intensité constante en deux temps.

3° la méthode mixte en deux temps.

D'une façon générale, on peut admettre que l'accumulateur au plomb genre Ironclad peut supporter un courant de charge d'autant

plus élevé qu'il est plus déchargé. Il peut supporter, par exemple après une décharge complète, un courant initial égal à six fois le courant de fin de charge. Pratiquement, on se tient dans des limites plus étroites et les constructeurs indiquent un courant de début de charge de 2, 5 fois le courant de fin de charge, lequel est lui-même le double du courant d'égalisation auquel il est recommandé de soumettre périodiquement la batterie afin de prolonger sa durée. Ces considérations sont essentielles pour étudier de quelle façon il y a lieu d'appliquer les méthodes de charge énumérées ci-dessus.

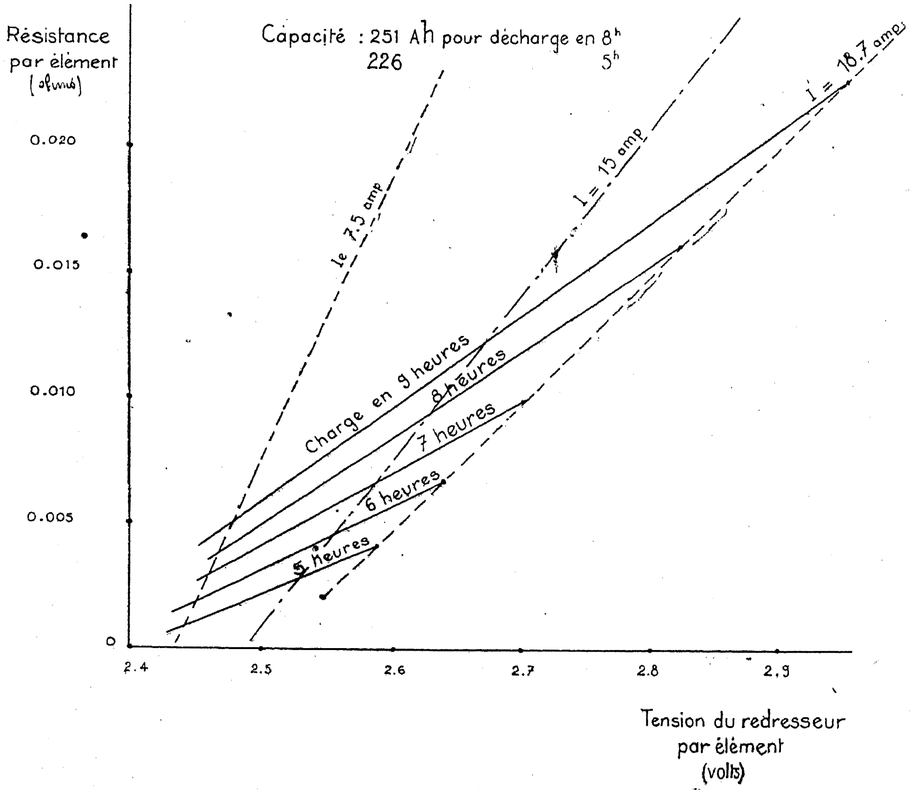


Fig. 1. — Méthode de charge à potentiel constant par résistance. Graphique pour le calcul de la résistance en fonction de la durée de charge.

1° *Méthode à potentiel constant.* — Cette méthode très simple vient immédiatement à l'esprit comme conséquence des considérations ci-dessus ; en effet, si l'on place une batterie déchargée aux bornes d'une source de courant continu de force électromotrice constante E supérieure à la force contre-électromotrice de la batterie U, le courant de charge étant limité par exemple par une résistance R, en série avec

la batterie, il est clair qu'au début de la charge le courant de charge sera plus élevé qu'à la fin, puisque la force contre-électromotrice de la batterie sera plus faible. Il existe deux méthodes permettant de limiter le courant de charge ; à savoir :

a) la méthode par résistance.

b) la méthode par inductance auto-régulatrice.

Cette seconde méthode n'est guère utilisable que lorsque la source est un redresseur.

a) *Méthode par résistance.* — Soient respectivement I_1 et I_2 les courants de début de charge et de fin de charge, U_1 et U_2 les valeurs de la force contre électromotrice de la batterie au début et à la fin de la charge. On voit immédiatement qu'il est facile, après s'être donné ces 4 valeurs, de déterminer E et R par les deux équations :

$$I_1 = \frac{E - U_1}{R}, \qquad I_2 = \frac{E - U_2}{R}.$$

I_1 différera d'autant moins de I_2 que E et R seront plus grands.

Pratiquement, on préfère déterminer E et R en se donnant une certaine durée de charge. La figure 1 est un graphique permettant de déterminer R pour différentes valeurs de E et de la durée de charge. Ce graphique a été établi pour une batterie dont les valeurs respectives du courant de charge initial, du courant de charge final et du courant d'égalisation sont 38, 15 et 7 A.

Les lignes pointillées indiquent les valeurs R, en fonction de E, pour obtenir un courant de fin de charge de 7,5, 15 et 18,7 A.

b) *Méthode par inductances auto-régulatrices.* — Le schéma est indiqué fig. 9 et 10. Chacune des phases du transformateur d'alimentation est connectée à une anode du redresseur par l'intermédiaire d'une inductance L. Soit alors E la valeur efficace de la tension de phase dont la valeur instantanée est $e = \sqrt{2}\, E \sin \omega t$ et U la force contre-électromotrice de la batterie.

La figure 2 donne les courbes représentant respectivement la tension de phase *e* et la tension de la batterie *u*, la première étant figurée par une sinusoïde et la seconde par une horizontale. Cette droite coupe la sinusoïde en un point *a* d'abscisse α_0 correspondant à l'instant pour lequel la tension de phase devient supérieure à la tension de la batterie, c'est-à-dire à l'instant pour lequel l'arc s'amorce sur l'anode considérée (1).

(1) D'une façon plus précise, U doit représenter dans tous les calculs qui suivent, non pas la force contre-électromotrice de la batterie, mais celle-ci augmentée de la chute de tension dans l'arc du redresseur, laquelle peut être considérée comme sensiblement constante.

La tension qui se développe aux bornes de l'inductance L équilibre à chaque instant la différence entre e et U pendant tout l'intervalle β correspondant à la durée du passage de l'arc pour l'anode considérée. Il est évident que la valeur moyenne de la tension développée aux bornes de l'inductance L par la composante alternative du courant anodique doit être nulle, puisque le flux à l'intérieur de cette bobine ne peut augmenter indéfiniment.

En conséquence, la valeur de β doit être telle que les aires $a\ b\ c$ et $c\ d\ e$ soient égales. Il en résulte que la durée de passage du courant anodique est parfaitement déterminée quand on connaît le rapport

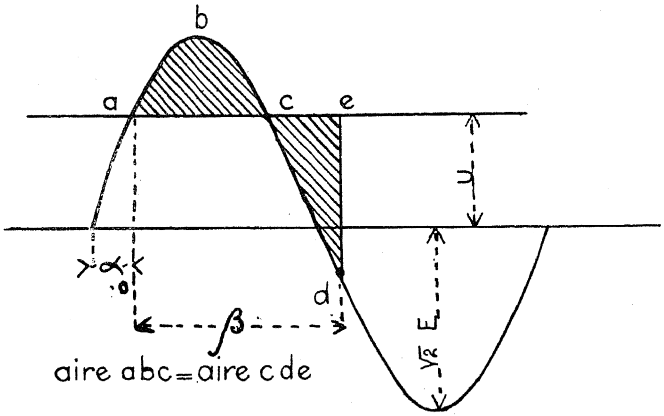


Fig. 2. — Méthode de charge à potentiel constant par inductances auto-régulatrices. Tension aux bornes des inductances.

$\frac{U}{\sqrt{2}E}$. L'angle d'amorçage α_0 est également déterminé par ce rapport. L'expression du courant anodique peut s'obtenir assez facilement par la méthode de décomposition en faisant la somme des différents courants développés séparément dans le circuit d'utilisation par e et par U.

e développe un courant de régime d'allure sinusoïdale et un courant transitoire d'allure exponentielle.

U développe un courant de sens inverse d'allure exponentielle. En négligeant la résistance ohmique des circuits, les courbes représentatives de ces deux dernières composantes se réduisent à des droites, ainsi qu'il est indiqué sur le graphique de la figure 3. L'expression du courant anodique ainsi calculée est :

$$i = -\frac{\sqrt{2}E}{L\omega}\cos\omega t + \frac{\sqrt{2}E}{L\omega}\cos\alpha_0 - \sqrt{2}E\sin\alpha_0\,\frac{\omega t - \alpha_0}{L\omega}.$$

Le courant de charge I aura pour valeur :

$$I' = n \cdot \frac{1}{2\pi} \int_{\omega t = \alpha_0}^{\omega t = \alpha_0 + \beta} i dt$$

$$= n \cdot \frac{\sqrt{2}E}{2\pi L\omega} \left[\cos\left(\frac{\beta}{2} - \alpha_0\right) \cos\frac{\beta}{2} + \frac{\beta}{2} \cos\alpha_0 - \frac{\beta^2}{4} \sin\alpha_0 \right].$$

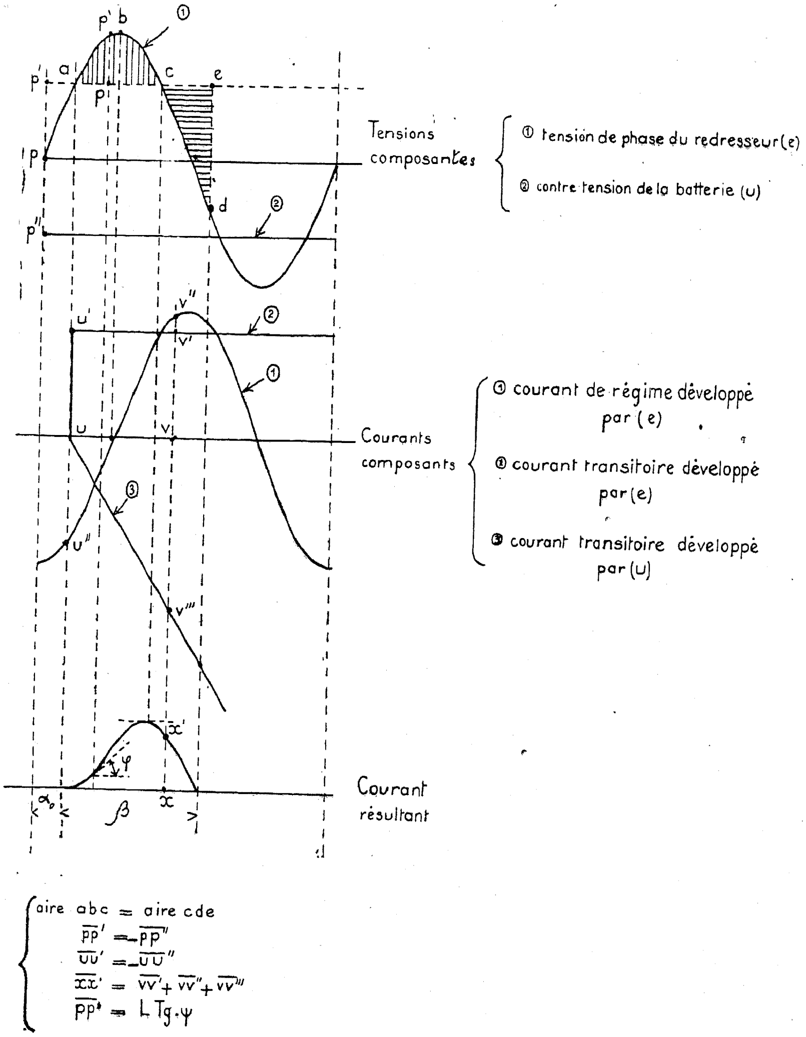


Fig. 3. — Méthode de charge à potentiel constant par inductances auto-régulatrices. Détermination graphique des composantes du courant anodique.

n étant le nombre de phases, le graphique de la fig. 4 donne les valeurs représentatives de $\frac{I}{I_{cc}}$ et de α_0 en fonction de $\frac{U}{\sqrt{2}E}$, I_{cc} étant une constante représentant la valeur du courant de court-circuit du redresseur, et dont l'expression connue est

$$I_{cc} = \frac{\sqrt{2}En}{L\omega}.$$

On remarquera que tous les éléments du graphique figure 3 sont déterminés par le rapport $\frac{U}{\sqrt{2}E}$, l'échelle des ordonnées des courants par rapport à celle des tensions étant déterminée lorsqu'on connaît L, soit directement, soit indirectement par la mesure de I_{cc}.

Cette courbe permet de déterminer l'un des 3 éléments I, L, E, lorsqu'on connaît deux d'entre eux. Toutefois, pratiquement, le pro-

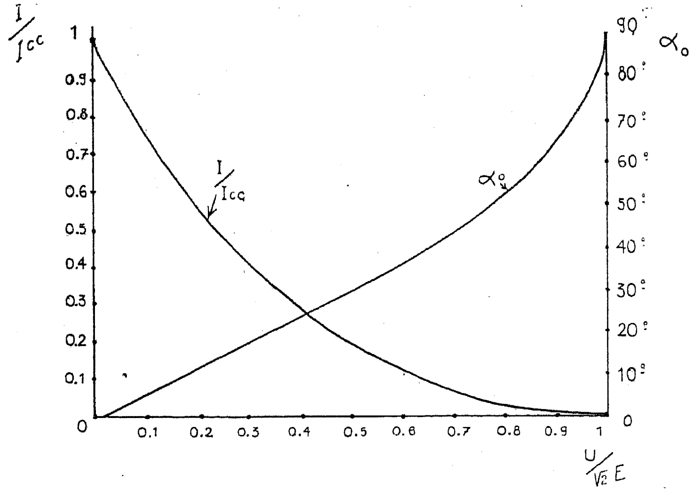


Fig. 4. — Méthode de charge à potentiel constant par inductances auto-régulatrices. Courant de charge en fonction de la force contre-électromotrice de la batterie.

blème se présente d'une façon un peu plus complexe. Les données sont U_1 U_2 tensions de la batterie au début et à la fin de la charge et I_1 et I_2 courants de charge initial et final. Les quantités que l'on cherche à déterminer sont E et L. Le problème peut se résoudre d'une façon assez élégante au moyen d'une méthode graphique indiquée par PRINCE (1). On établit la courbe donnant $\frac{I}{I_{cc}}$ en fonction de $\frac{U}{\sqrt{2}E}$ mais en la transformant par l'emploi d'un nouveau système de coordonnées à échelle logarithmique, les valeurs du rapport $\frac{I}{I_{cc}}$ étant portées en abscisses et celles du rapport $\frac{U}{\sqrt{2}E}$ étant portées en ordonnées (fig. 5). Supposons le problème résolu et qu'on ait déterminé

(1) PRINCE et VOGDES, *Mercury arc rectifiers*.

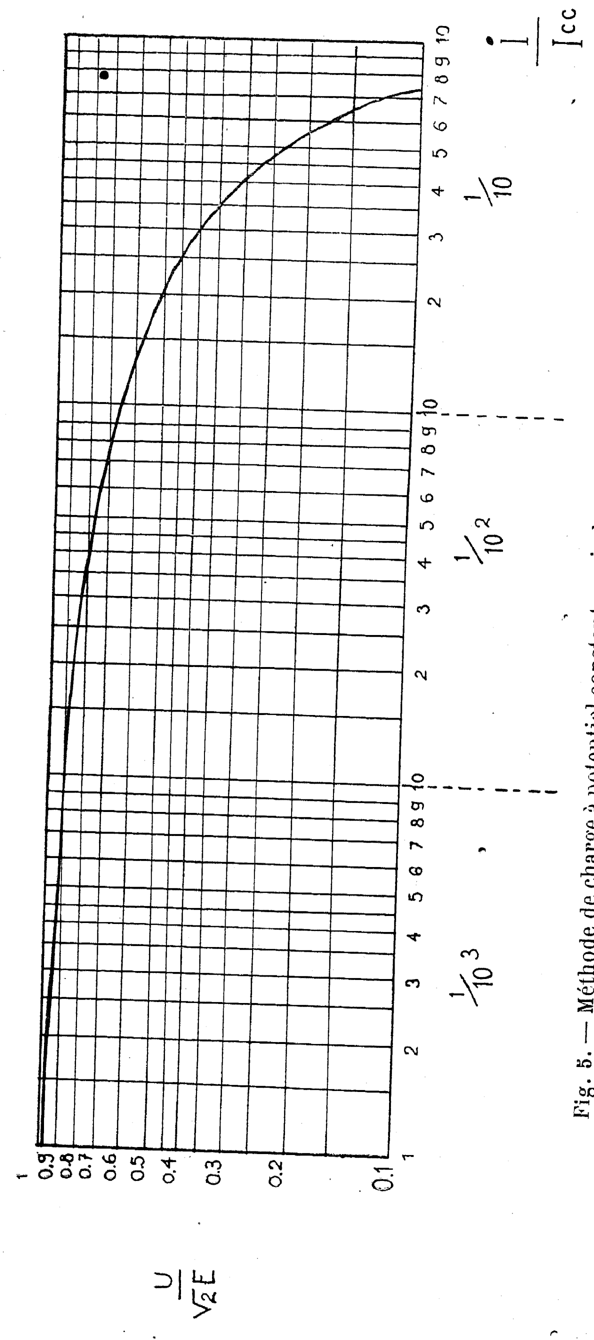
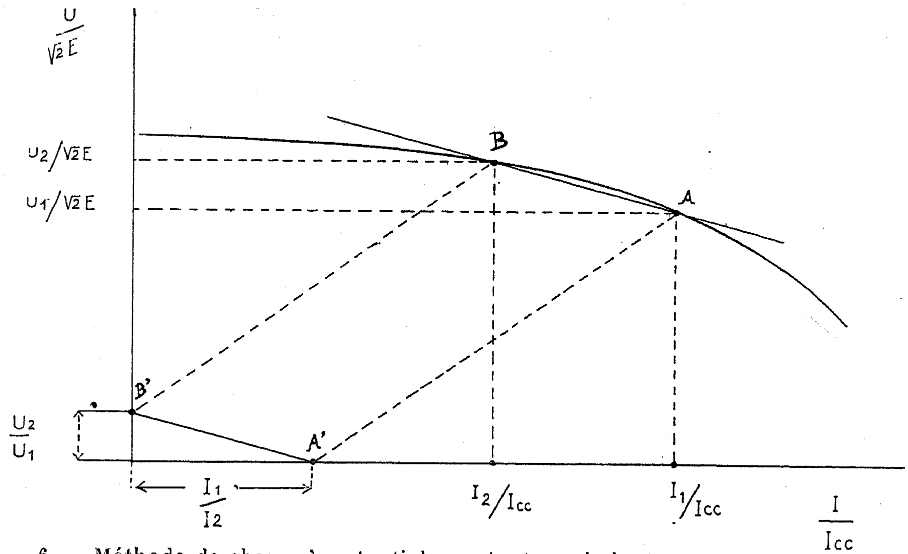


Fig. 5. — Méthode de charge à potentiel constant par inductances auto-régulatrices. Graphique pour le calcul de la valeur des inductances et de la tension de phase.

L (et par conséquent I_{cc}) ainsi que E de telle sorte que le courant initial de charge soit I_1 la contre-tension de la batterie étant U_1 et le courant final étant I_2 la contre-tension de la batterie étant U_2. Les points figuratifs du début et de la fin de la charge seront donc, sur le graphique (voir fig. 6), les points A et B dont les coordonnées sont



. 6. — Méthode de charge à potentiel constant par inductance auto-régulatrice. Mode d'emploi du graphique fig. 5.

respectivement

$$\frac{I_1}{I_{cc}} \quad \text{et} \quad \frac{U_1}{\sqrt{2}E} \quad \text{et} \quad \frac{I_2}{I_{cc}}, \quad \frac{U_2}{\sqrt{2}E}.$$

L'inclinaison de la droite AB ne dépend que de la différence respective des abscisses et des ordonnées des deux points figuratifs, c'est-à-dire de la longueur des segments AC et BC. Mais l'échelle étant logarithmique, la longueur de ces segments ne dépend que du rapport de la valeur numérique des abscisses ou des ordonnées correspondant à leurs extrémités. Or ces rapports, $\frac{I_1}{I_2}$ pour AC, et $\frac{U_2}{U_1}$ pour BC, sont connus. On peut donc construire un triangle A'B'C' dont les côtés de l'angle droit aient pour valeur respective ces rapports. La droite A'B' donne donc l'inclinaison de la droite AB. Il suffit alors de promener le long de la courbe un segment AB, le point A décrivant la courbe et le segment AB restant constamment parallèle à A'B' jusqu'à ce que le point B vienne rencontrer la courbe, c'est-à-dire jusqu'à ce que le segment AB soit exactement

sécant à celle-ci, tout en restant parallèle à A'B'. Le problème est alors résolu puisque la mesure de l'un ou l'autre des couples de coordonnées de A ou B permet de déterminer E et I_{cc} et par la suite L au moyen de la formule

$$I_{cc} = \frac{\sqrt{2}En}{L\omega}.$$

2° *Méthode à intensité constante en deux temps.* — L'inconvénient de la méthode à potentiel constant est de ne pas préciser la durée de charge, laquelle peut dans certains cas, être excessive et incompa-

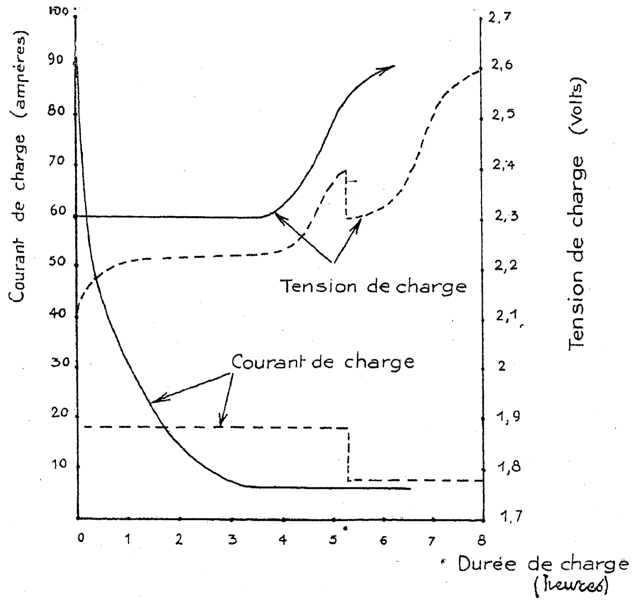


Fig. 7. — Méthode de charge à deux régimes : traits pointillés : à courant constant. traits pleins : mixte.

tible avec les nécessités de l'exploitation. Dans de nombreux cas, 9 heures est un maximum pour les batteries ironclad et 6 à 7 heures pour les batteries fer-nickel.

Pour accélérer la vitesse de charge, on maintient un courant de charge constant et égal à la vitesse précisée par le constructeur comme valeur convenable du courant initial jusqu'à ce que la tension aux bornes de la batterie atteigne 2,4 V. A partir de ce moment, on abaisse le courant de charge à la valeur spécifiée par le constructeur comme valeur de courant de fin de charge et l'on maintient cette valeur de courant pendant un temps fixé parfaitement déterminé pour une batterie donnée et indépendante de l'état de décharge antérieur de la

batterie. Les courbes représentant respectivement l'allure de la tension et du courant de charge lorsqu'on applique cette méthode, sont indiquées en pointillé sur la figure 7.

Pratiquement, ainsi que nous l'avons indiqué plus haut, il est permis, pour diminuer la durée de la charge, d'adopter comme valeur initiale du courant de charge pendant la première partie de l'opération (tension inférieure à 2,4 V par élément) une valeur d'autant plus élevée que la batterie est moins déchargée.

Le graphique montre que cette méthode de charge nécessite une tension variable aux bornes du redresseur. Pratiquement elle ne peut être réalisée avec un redresseur ordinaire qu'en utilisant l'intervention manuelle, c'est-à-dire en équipant le redresseur avec un régulateur de tension permettant à chaque instant de faire varier la tension du redresseur en fonction de la tension de la batterie pour maintenir constant le courant de charge.

3° *Méthode mixte en deux temps.* — Pour accélérer encore la vitesse de charge, il est possible d'adopter, comme valeur initiale du courant de charge, une valeur plus grande que celle normalement indiquée, laquelle, comme nous l'avons mentionné plus haut, est de l'ordre de 2,5 fois le courant final.

Ainsi que nous l'avons dit, le courant initial peut être d'autant plus élevé que la batterie est plus déchargée et peut atteindre jusqu'à six fois la valeur normale du courant initial à courant constant. Bien entendu, il est nécessaire dans ce cas d'opérer non plus à courant constant, mais de réduire ce courant au fur et à mesure que la charge augmente. Ceci peut parfaitement être réalisé en utilisant pendant cette première partie de la charge la méthode à potentiel constant, la force électromotrice du redresseur et la résistance ou les inductances auto-régulatrices étant calculées de telle sorte, que le courant final, pour une tension d'environ 2,3 V par élément, soit égal au courant final prescrit pour la batterie considérée et que le courant initial, lorsque la batterie est complètement déchargée (ce qui correspond à une tension d'environ 2,1 V par élément), soit égal à 5 ou 6 fois ce courant final. Dans cette méthode de charge, la première partie, à potentiel constant, peut s'opérer automatiquement. La seconde partie, au contraire, nécessite une intervention manuelle de façon à faire varier la tension du redresseur pour maintenir constante l'intensité de fin de charge. Les courbes représentant respectivement l'allure de la tension et du courant de charge lorsqu'on applique cette méthode sont indiquées en traits pleins sur la figure 7.

B) *Accumulateurs fer-nickel.*

Dans le cas des accumulateurs fer-nickel, la méthode la plus pratique est en même temps la méthode la plus rapide : c'est la méthode à courant constant pendant toute la durée de la charge. L'accumulateur fer-nickel, en effet, ne nécessite pas autant de précautions, en ce qui concerne le régime de charge, que l'accumulateur au plomb. On a donc intérêt à le charger en maintenant pendant toute la durée de la charge le courant maximum que la batterie est susceptible d'absorber. La tension d'un élément fer-nickel varie en général de 1,5 V au début de la charge à 1,85 V et même 1,90 V à la fin de la charge. Le courant de charge est seulement déterminé par la capacité de la batterie et la vitesse de charge. En général, on admet des vitesses de charge de l'ordre de 6 à 7 heures; cependant, on réduit parfois jusqu'à 5 heures la durée de charge. Le débit de charge se calcule par la formule simple

$$I = \frac{C}{rD},$$

C étant la capacité en ampères-heures, D la durée de charge et r le rendement de la batterie lequel est de l'ordre de 0,65 pour les batteries fer-nickel. Il sera donc nécessaire d'utiliser un redresseur à tension variable permettant de maintenir constant le courant calculé au moyen de la formule ci-dessus, tandis que la tension par élément de la batterie s'élèvera progressivement de 1,5 V à 1,85 V.

Charge automatique.

Pour résoudre complètement le problème de la charge automatique d'une batterie, il y a deux conditions essentielles à satisfaire :

a) maintenir à chaque instant de la durée de la charge le courant de charge à la valeur convenable correspondant à l'état de charge de la batterie, c'est-à-dire réaliser la *régulation automatique du courant de charge ;*

b) arrêter la charge dès que la batterie est complètement chargée pour éviter à la fois une détérioration de la batterie et un gaspillage inutile d'énergie, c'est-à-dire réaliser l'*arrêt automatique de fin de charge.*

a) *Régulation automatique du courant de charge.* — Nous avons indiqué précédemment que dans le cas de la méthode à potentiel

constant, cette régulation s'obtenait sans aucun dispositif spécial autre que la simple insertion dans le circuit d'une résistance ou d'inductances auto-régulatrices.

Le problème est plus complexe lorsqu'il s'agit de réaliser automatiquement la charge à courant constant, soit en deux temps (Ironclad) soit en un temps (fer-nickel). On pourrait évidemment concevoir une réalisation de ce système d'automaticité en équipant le redresseur avec un régulateur d'induction ou un auto-transformateur à prises permettant de faire varier la tension continue par variation de la tension côté alternatif et en commandant cet appareil de réglage par un petit servo-moteur, lui-même commandé par un régulateur à action rapide contrôlant le débit de l'appareil, mais il est évident qu'un tel dispositif, relativement onéreux, et n'est pratiquement pas applicable à des redresseurs de puissance aussi réduites que celles qui sont ordinairement employées pour la charge des batteries.

Une solution plus élégante et moins coûteuse est celle qui consiste à utiliser pour le redresseur des valves pourvues de grilles à potentiel contrôlé auxquelles on a donné le nom de thyratrons. Bien qu'il ne s'agisse là en réalité que d'une solution d'avenir qui n'ait été réalisée pour l'instant qu'au laboratoire, il nous paraît intéressant de donner un aperçu du fonctionnement du thyratron appliqué à la charge automatique des batteries à intensité constante, soit en deux temps, soit en un temps. On sait que les *thyratrons* actuellement disponibles sur le marché sont des valves du type à cathode à filament et à vapeur de mercure. Leurs caractéristiques sont indiquées dans la colonne (VI) du tableau récapitulatif des différentes valves redresseuses que nous donnons ci-après.

Nous donnons dans un appendice à la présente communication la description d'un redresseur pour charge automatique à courant constant équipé avec thyratrons et avec dispositif d'arrêt de fin de charge.

b) *Arrêt automatique de fin de charge.* — Les conditions sont assez différentes suivant qu'il s'agit d'éléments au plomb ou d'éléments fer-nickel. D'une façon générale, un tel dispositif est surtout intéresant, au point de vue de l'entretien de la batterie, dan le cas d'une batterie au plomb. Dans le cas d'une batterie fer-nickel, son intérêt se réduit à éviter un gaspillage inutile d'énergie.

Nous décrirons brièvement les deux dispositifs les plus couramment employés, et qui sont le dispositif horo-voltmétrique (système Pöhler) et le dispositif ampèreheuremétrique (système Sangamo).

1° *Dispositif horo-voltmétrique.* — Le seul indice de fin de charge pratiquement utilisable pour un dispositif d'arrêt automatique est la tension de la batterie. Il semblerait donc qu'un relais voltmétrique puisse suffire. En réalité, si l'on se reporte à la figure 8 qui donne la courbe représentative de la tension aux bornes en fonction de la durée de la charge, on remarque qu'à partir du moment où la batterie est prête d'atteindre sa tension maximum de fin de charge, cette tension varie très peu en fonction du temps.

Il faudrait donc des relais d'une extrême précision. D'autre part,

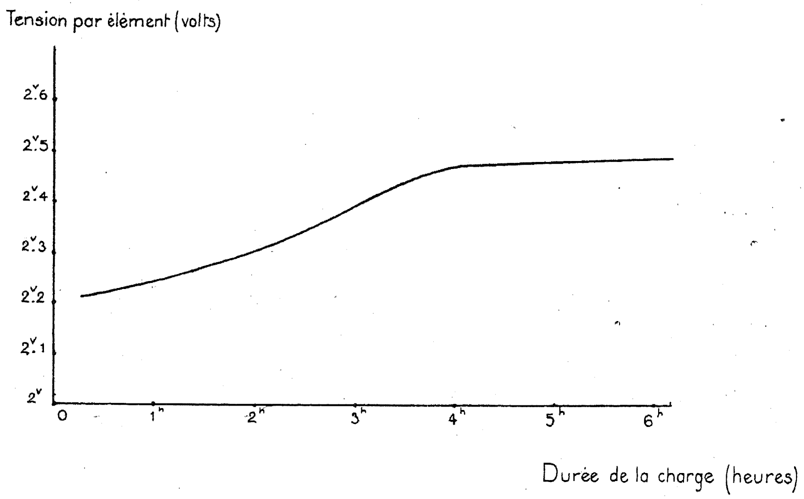


Fig. 8. — Tension aux bornes d'une batterie Ironclad en fonction de la durée de la charge.

la tension finale dépend de l'état de la batterie, de la température et du régime de charge. Cette méthode n'est donc pas utilisable pratiquement.

On lui substitue la méthode horo-voltmétrique qui est fondée sur le fait d'expérience suivant : à partir du moment où un élément au plomb type ironclad atteint une tension de 2,35 à 2,4 V, la quantité d'électricité nécessaire pour achever sa charge est constante et indépendante de l'état de décharge antérieure de la batterie.

D'autre part, ainsi qu'on peut le remarquer en se reportant à la figure 8, la tension se relève rapidement à partir du moment où la tension par élément atteint 2,4 V.

Il est donc possible d'utiliser un relais voltmétrique fonctionnant en toute sécurité dès que la tension par élément de la batterie atteint cette valeur. Ce relais actionne alors une minuterie, laquelle

déclenche un interrupteur au bout d'un intervalle de temps donné. Un réglage permet de faire varier cet intervalle de temps de quart d'heure en quart d'heure depuis un quart d'heure jusqu'à trois heures. Pratiquement, cette durée est de l'ordre de 1 heure 1/2 à 2 heures 1/2.

Le schéma d'un tel relais horo-voltmétrique est indiqué sur la figure 9 où il est représenté en connexion avec un redresseur.

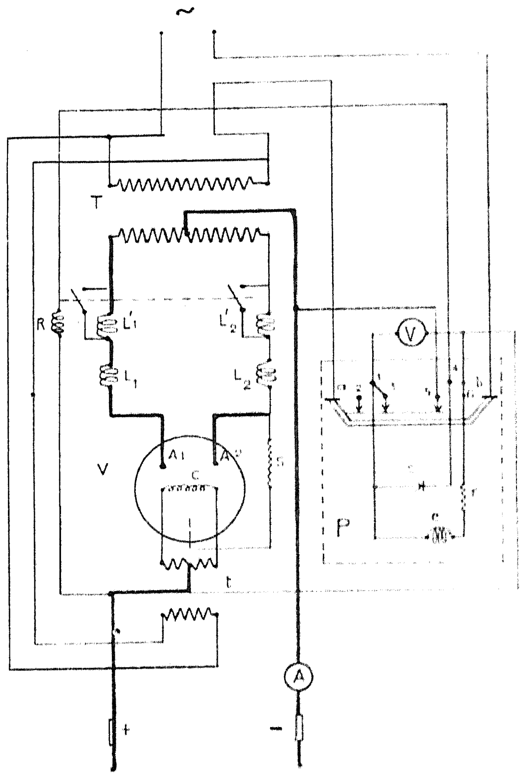


Fig. 9. — Schéma d'un redresseur diphasé équipé avec ampoule dianodique du type cathode à filament. — Charge à deux régimes à potentiel constant avec inductances auto-régulatrices — Passage automatique d'un régime à l'autre et arrêt automatique de fin de charge par interrupteur horo-voltmétrique (système Pöhler).

Les contacts principaux *a* et *b* permettent d'ouvrir ou de fermer le circuit d'alimentation du redresseur. Les contacts 5 et 6 sont connectés respectivement aux pôles négatif et positif du redresseur et de la batterie.

Lorsque l'interrupteur est fermé, l'électro *e* se trouve ainsi soumis à la tension de la batterie par l'intermédiaire des contacts auxiliaires 3 et 5, le courant parcourant *e* étant limité par la résistance *r*.

Cet électro *e* n'est autre que l'électro d'un relais voltmétrique qui déclenche dès que la tension de la batterie atteint 2,4 V par élément. Ce déclenchement met en action la minuterie, laquelle provoque, au bout d'un temps déterminé, l'ouverture des contacts principaux *a* et *b*, et par suite l'arrêt de la charge.

Un des avantages de l'interrupteur système Pöhler est que le relais voltmétrique provoque non seulement la mise en route de la minuterie, mais encore l'ouverture d'un contact auxiliaire *c*, qui permet de commander un relais auxiliaire supplémentaire, ce qui présente un grand intérêt lorsqu'on veut soumettre la batterie à deux régimes de charge : un régime à charge accélérée quand la tension est inférieure à 2,4 et un régime de fin de charge quand la tension est supérieure à 2,4 V.

Par exemple, dans le schéma représenté figure 9, ce contact auxiliaire *c* permet d'ouvrir le circuit d'un relais R connecté à l'interrupteur Pöhler par le contact 4. Ce relais provoque l'ouverture de deux interrupteurs qui, au début de la charge, court-circuitent les inductances auto-régulatrices additionnelles L'_1 et L'_2. Il en résulte que le débit à la fin de la charge, après que la tension par élément a dépassé 2,4 V, s'effectuera avec un régime de charge notablement plus faible qu'au début de la charge, du fait de l'insertion de ces inductances additionnelles.

Sur la figure 9 on suppose que les contacts *a* et *b* permettent de couper directement le circuit d'alimentation du redresseur. Pour de plus grosses unités, l'interrupteur, au lieu d'être utilisé à couper le circuit principal, sert à couper celui d'une bobine de disjonction à tension nulle, laquelle fait disjoncter l'interrupteur principal.

C'est ce dispositif qui est indiqué sur le schéma de la figure 11.

2° *Dispositif ampère-heuremétrique.*— Le dispositif précédent n'est pas applicable aux accumulateurs fer-nickel. Le dispositif ampère-heuremétrique, au contraire, s'y adapte parfaitement.

Ce dispositif est constitué par un compteur d'ampères-heures muni d'un contact auxiliaire provoquant la coupure du courant de charge dès que le nombre d'ampères-heures débités pendant la charge a atteint une valeur déterminée.

Une particularité de ce type de dispositif est d'être utilisé plus avantageusement à poste mobile sur les engins locomoteurs qu'à poste fixe sur le redresseur.

Le compteur est considéré comme faisant partie intégrante de la batterie. Il est parcouru par le courant de charge dans un sens et par

le courant de décharge en sens inverse. Il est muni d'un cadran parcouru par une aiguille tournant dans un sens pendant la charge, et

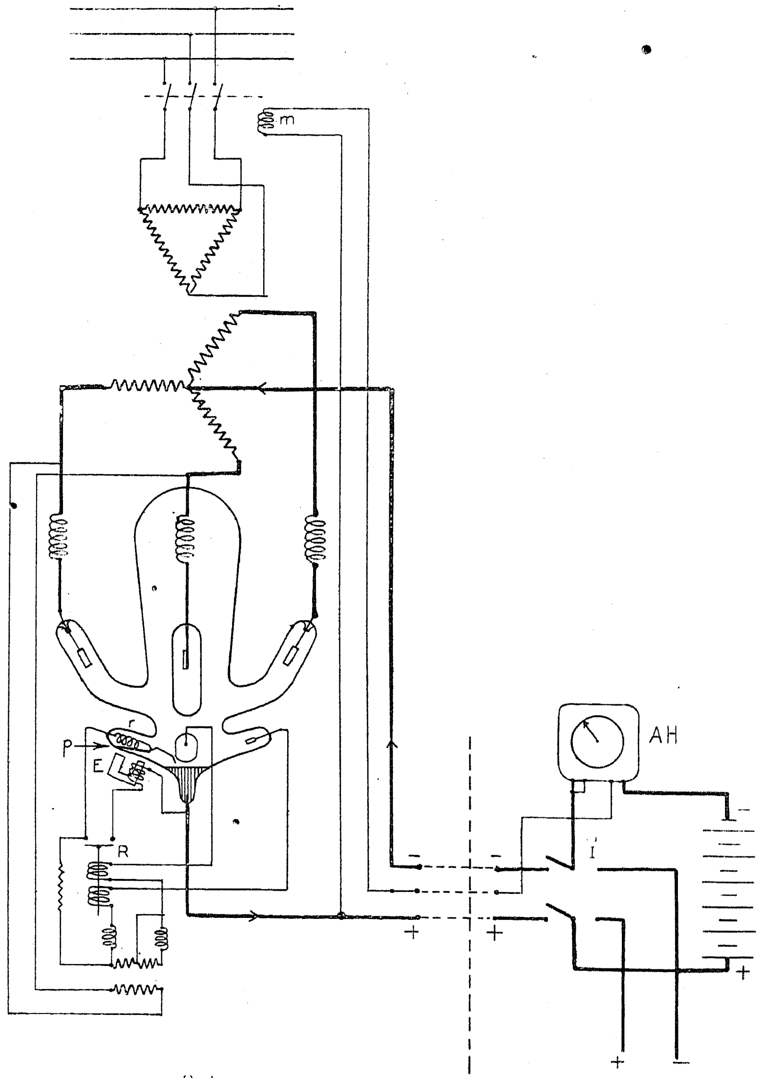


Fig. 10. — Schéma d'un redresseur triphasé équipé avec ampoule trianodique du type cathode liquide. — Allumage statique par anode mobile. — Charge à potentiel constant par inductances auto-régulatrices. — Arrêt automatique de fin de charge par interrupteur ampère-heuremétrique (système Sangamo) placé avec la batterie sur l'engin locomoteur.

en sens inverse pendant la décharge, en sorte que la position de cette aiguille permet à chaque instant au conducteur de se rendre compte du nombre d'ampères-heures disponibles dans la batterie.

Il y a lieu de noter que, pour tenir compte du rendement de la batterie, une petite résistance, automatiquement insérée dans le compteur au moment de la décharge, a pour effet de freiner son mouvement et d'exiger à la charge un nombre d'ampères-heures supérieur, au rendement près au nombre d'ampères-heures utilisés pendant la décharge et qu'il s'agit de récupérer.

La figure 10 donne le schéma des connexions d'un compteur Sangamo avec la batterie d'une part et le redresseur d'autre part. Le compteur est placé à côté de la batterie sur le chariot. Un inverseur bipolaire permet de brancher la batterie aux bornes du redresseur dans la position charge ou aux bornes du circuit d'utilisation (moteurs du chariot) dans la position décharge. Dans les deux positions, le compteur est en série avec la batterie et son index opère ainsi l'addition (position charge) ou la soustraction (position décharge) des ampères-heures reçus ou débités par la batterie. Lorsque la décharge est complète, l'index, par l'intermédiaire d'un contact d'ouverture, coupe le courant d'une bobine à minima *m* qui provoque le déclanchement de l'interrupteur principal du redresseur.

Principaux types de valves redresseuses.

Etant données les constantes des batteries couramment utilisés en traction, on dispose d'une assez grande variété de valves redresseuses dont le domaine d'application convienne à la charge de ces batteries

Les caractéristiques principales de ces différentes valves sont indiquées dans le tableau récapitulatif ci-après.

On remarquera que ces valves peuvent se diviser en deux grandes catégories, les valves à cathode liquide (mercure) et les valves à filament (tungstène thorié ou nickel recouvert d'une matière à grand pouvoir émissif, tel qu'un sel de baryum). Cette division théorique correspond pratiquement à une différence notable dans les procédés d'amorçage.

Pour les valves de la seconde catégorie, il suffit de chauffer le filament en l'alimentant en courant alternatif sous tension convenable jusqu'à ce qu'il atteigne la température de régime prévue pour le fonctionnement normal. Il suffit donc de fermer un simple interrupteur pour provoquer l'amorçage.

Pour les valves de la première catégorie, l'amorçage est plus délicat, car il est nécessaire de faire apparaître sur la cathode liquide la tache cathodique. On y parvient en utilisant une électrode auxiliaire, dite électrode d'allumage, reliée à une source auxiliaire de telle façon

qu'en amenant cette électrode auxiliaire au contact de la cathode, la source d'allumage débite un courant *dirigé de l'anode d'allumage vers la cathode*. Si l'on provoque l'ouverture de ce contact, la rupture du courant provoque une étincelle d'extra-courant, l'apparition de la tache cathodique et l'amorçage de la valve. La rupture du circuit d'allumage s'effectue, soit par basculage de l'ampoule, soit par l'utilisation d'une électrode mobile commandée par un système électromagnétique.

Qu'elle soit à cathode liquide ou à cathode à filament, toutes ces valves sont des valves à ionisation et à décharge par arc (1).

On sait, depuis les travaux de COMPTON et de LANGMUIR, que la décharge par arc, dans les valves à atmosphère raréfiée, est caractérisée par :

1° Conductibilité entre électrodes obtenue, non seulement par émission des électrons de la cathode, mais encore par ionisation des molécules neutres.

2° Suppression de la charge spatiale par suite de la présence d'ions positifs dans l'atmosphère conductrice (d'où conductibilité supérieure et plus faible chute de tension entre électrodes que dans les valves à émission pure).

3° Entretien de la température de régime de la cathode, du fait du bombardement des ions positifs (ce qui explique la permanence de la tache cathodique dans les valves à cathode liquide).

4° Accélération de l'émission électronique de la cathode par effet d'arrachement électrostatique dû à l'existence d'un gradient de potentiel très élevé au voisinage de la cathode.

Le gaz ou la vapeur qui subit le phénomène de l'ionisation à l'intérieur de la valve est, soit de la vapeur de mercure, soit un gaz dit gaz noble, monoatomique, tel que l'argon ou le néon, soit une vapeur de métal monoatomique tel que le potassium ou le sodium. Ces gaz et ces vapeurs ont été adoptés parce que la valeur de leur potentiel d'ionisation permet de maintenir la tension d'amorçage et la chute de tension dans l'arc au-dessous des valeurs compatibles avec l'utilisation pratique de ces appareils et peut être comprise dans les limites au delà desquelles il serait impossible d'empêcher la destruction d'une cathode à filament par le bombardement des ions positifs.

---

(1) Toutefois les valves de la catégorie VI du tableau ci-joint (type HULL) sont des valves à *décharge diffuse, sans* spot cathodique localisé, tandis que les valves des autres catégories sont des valves à *décharge concentrée, avec* spot cathodique localisé.

Le problème de la protection de la cathode contre les effets destructeurs de ce bombardement, c'est-à-dire dans une certaine mesure le problème de la longévité de l'ampoule, ne se pose pas pour les valves à cathode liquide, puisque cette cathode se régénère par la condensation des vapeurs volatilisées sur la tache cathodique. Il se pose au contraire d'une façon très délicate pour les valves à filament. Sans entrer dans le détail des précautions prises pour la protection des cathodes à filament, nous pouvons résumer par l'énumération ci-après quelles sont les principales :

1° choix d'une température de régime convenable du filament.

2° choix d'une pression interne du gaz ou de la vapeur telle que le libre parcours moyen des ions positifs soit limité de telle sorte que ceux-ci ne puissent atteindre une énergie cinétique suffisante pour provoquer la désagrégation de la cathode.

3° Constitution de l'atmosphère interne par un gaz dont la tension de désintégration (1) soit supérieure à la tension d'ionisation.

4° Exclusion aussi parfaite que possible des gaz étrangers occlus dans les parois et les électrodes.

5° Augmentation du pouvoir émissif de la cathode.

Toutes ces précautions ne sont pas simultanément indispensables. Certaines mêmes sont incompatibles. C'est le choix de l'une ou l'autre d'entre elles qui place la valve dans l'une ou l'autre des catégories du tableau ci-joint.

Caractéristiques d'un redresseur pour charge de batterie

Comme n'importe quel redresseur, un tel redresseur est essentiellement constitué par le transformateur d'alimentation et la valve, ou les valves. En général il est nécessaire d'utiliser plusieurs valves pour assurer le débit de charge. Toutefois les valves polyanodiques type (I) et (V) peuvent assurer le débit avec une seule ampoule. — Pour des débits inférieurs à 30 ampères, on se contente en général de redresseurs improprement appelés monophasés, et en réalité *diphasés*, car le secondaire présente *deux* phases en opposition alimentant chacune une anode. — Pour des débits supérieurs on utilise soit le montage triphasé avec 1 valve type (I) trianodique, ou avec 3 valves monoanodiques type (III) (IV) ou (V), soit le montage hexaphasé avec 3 valves dianodiques type (V).

(1) On appelle tension de désintégration une certaine tension critique, dépendant du poids atomique de l'atmosphère gazeuse, au delà de laquelle l'énergie cinétique des ions positifs devient suffisante pour provoquer la désintégration de la cathode.

	Cathode liquide (Pool Type)		Cathode a filament (Hot cathode Type)			
	A vapeur de mercure (Type ordinaire) (1).	A atmosphère de gaz noble (Type Argonal) Rectigor	A atmosphère de gaz noble (Type Tungar).	A atmosphère de gaz noble (Type à oxyde).	A atmosphère de gaz noble (Type Germershausen).	A vapeur de mercure (Type Hull).
Débit maximum (par ampoule).	80 A.	10 A.	15 A.	30 A.	30 A.	25 A.
Tension maxima redressée.	500 V.	30 V.	65 V.	75 V.	250 V.	1 000 V.
Chute de tension interne.	15 à 18 V.	15 à 18 V.	8 à 12 V.	8 à 12 V.	15 V.	12 V.
Température de la cathode.	3.000 à 3.500° (3).	3.000 à 3.500° (3).	2.200°.	800 à 900°.	800 à 900°.	1250°.
Pression de la vapeur (2).	1/100 à 1/10.	60 à 80 (?)	60 à 80.	2.	1 à 2.	20/1000 à 200/2000.
Nature de l'atmosphère.	Mercure.	Argon.	Argon.	Argon ou mercure.	Argon.	Sodium, potassium ou mercure.
Mode d'allumage.	Basculage ou électrode mobile	Décharge disruptive avec électrode fixe.	Chauffage filament.	Chauffage filament.	Chauffage filament.	Chauffage filament.
Caractéristiques spéciales	Bras d'anode. Ampoule polyanodique. (I)	(II)	Cathode de tungstène thorié. (III)	Cathode à oxyde rapporté (Baryte). (IV)	Ecran d'anodes. Ampoule polyanodique. (V)	Ecran de cathode. Cathode à oxyde rapporté (Baryte). (VI)

(1) Sans ventilation. (2) En millimètres de mercure. (3) Sur la tache cathodique.

Les redresseurs pour charge de batterie nécessitent un système d'amorçage simple, robuste, et relativement peu coûteux. Certains dispositifs utilisés pour des redresseurs de puissance plus élevée sont à prohiber pour cette application.

Les figures 9 et 10 représentent respectivement un redresseur *diphasé* avec ampoule type (V) et un redresseur triphasé avec ampoule type (I). On remarquera sur la première que l'organe essentiel du dispositif d'amorçage est le transformateur de chauffage *t*, dans le secondaire duquel se superposent le courant alternatif de chauffage et le courant redressé qui sort de l'appareil par le point milieu de ce secondaire. Ce point milieu constitue donc le pôle positif de l'appareil, tandis que le point milieu du transformateur principal T en constitue le pôle négatif. Les primaires des deux transformateurs sont branchés simultanément sur le réseau alternatif. Le type d'ampoule (V), présentant des écrans d'anode qui rendent l'amorçage moins facile, utilise un artifice pour tourner cette difficulté et qui consiste en une électrode auxiliaire non soumise à l'action des écrans. Une résistance ohmique élevée S, (en silite) empêche cette anode de débiter dès qu'elle a provoqué l'amorçage.

La figure 10 donne quelques précisions sur un système d'allumage statique d'une ampoule type (I) au moyen d'une électrode mobile commandée par un dispositif électromagnétique. L'anode d'amorçage est fixée à l'extrémité d'un ressort à boudin *r* sur l'extrémité duquel vient également s'articuler une palette de métal magnétique *p* susceptible d'être attirée par l'électro E et de provoquer ainsi, par flexion du ressort *r*, l'immersion de l'extrémité de *a* dans le mercure de la cathode. Lorsqu'on met sous tension le transformateur d'excitation, la moitié de son secondaire alimente, par l'intermédiaire du contact *ab* du relais R, l'électro E, lequel attire *p* ce qui provoque le contact de *a* avec la cathode. E se trouvant court-circuité, l'attraction cesse, le contact de *a* avec la cathode est rompu et l'étincelle d'extra-courant provoque l'amorçage, si elle est dirigée *vers* la cathode. Sinon, une nouvelle attraction a lieu jusqu'à ce que l'amorçage se produise. A ce moment, les anodes d'excitation débitent à travers les enroulements du relais R, provoquant ainsi l'ouverture du contact *a b* et la mise hors circuit de l'électro et de l'anode d'amorçage. On remarquera que ce système très simple réalise néanmoins deux conditions auxquelles ne satisfont pas toujours les dispositifs d'allumage statique assez nombreux qu'on a proposés ;

1° Les enroulements du relais mettant hors circuit les organes d'amorçage dès que les anodes d'excitation commencent à débiter, ne sont pas connectés dans le fil neutre (relié au point milieu) du secondaire du transformateur d'excitation, de façon à ne pas être insérés dans le circuit qui se ferme au moment du contact de l'électrode d'allumage et à ne pas limiter la valeur du courant d'amorçage.

2° En service normal, l'anode d'allumage n'est pas en contact avec la cathode, ce qui évite une migration de la tache cathodique sur cette anode.

Un point important à signaler pour les redresseurs de charge de batterie est le danger d'utiliser, pour l'alimentation, un auto-transformateur. Les constructeurs sont tentés de le faire pour les redresseurs diphasés, parce que la tension d'un réseau 110 V est souvent voisine du double de la tension de phase secondaire, ce qui permet d'utiliser un auto-transformateur de puissance réduite. Malheureusement, l'isolement d'une batterie de traction est souvent assez précaire, en sorte qu'on risque, en utilisant un autotransformateur, de mettre le réseau à la terre, ce qui peut provoquer un court-circuit mettant hors service la valve. L'usage d'un transformateur d'alimentation *à enroulements séparés* s'impose surtout dans le cas des installations de charge automatique, mais nous pensons que l'autotransformateur devrait être prohibé de *toute* installation de charge de batterie de traction.

Le rendement d'un redresseur de charge de batterie dépend de la capacité et surtout de la tension de la batterie à recharger, puisque le rendement propre de la valve est donné par la formule connue

$$\eta = \frac{U}{U + \varepsilon},$$

U étant la tension de la batterie et ε la chute de tension dans l'ampoule. Le rendement global peut être de l'ordre de 70 à 80 pour cent pour une batterie de 50 V et de 80 à 90 pour cent pour une batterie de 100 V.

Les principaux avantages des redresseurs à valves sur les groupes rotatifs sont les suivants :

1° Remise en service automatique et presque instantanée après une interruption momentanée du secteur, ce qui est particulièrement appréciable pour des installations de charge automatique sans surveillance.

2° Inutilité d'un conjoncteur-disjoncteur empêchant la batterie de débiter dans la source, étant donné le fonctionnement irréversible du redresseur.

3° Fonctionnement silencieux.

4° Entretien à peu près nul se réduisant au remplacement périodique des ampoules dont la durée suivant les types peut varier de 4 000 à 10 000 heures.

Résumé.

Les redresseurs appliqués à la charge des batteries de traction sont des redresseurs de puissance relativement faible, ne dépassant guère 3 kW pour la traction sur bandages et 10 kW pour la traction sur voie étroite. Pour cette raison, ils n'ont peut-être pas fait l'objet d'études aussi poussées que les redresseurs de grosse puissance et c'est ce qui explique que leur développement dans ce domaine d'application paraisse un peu lent. La mise au point d'une construction mieux adaptée à cette application et l'apparition de nouvelles valves, paraissent devoir leur donner un regain d'intérêt auprès des usagers de la traction par accumulateurs. On a notamment reconnu la nécessité d'utiliser des transformateurs à enroulements séparés, des dispositifs d'amorçage statique très simples et très robustes, et un appareillage prévoyant l'emploi à peu près constant d'interrupteurs automatiques de fin de charge. Le réglage automatique du courant de charge sous potentiel constant par inductances autorégulatrices peut se réaliser en prédéterminant ces inductances au moyen d'une méthode pratique et précise qui a été exposée. Elle nécessite la mesure d'une constante dont l'importance n'a pas toujours été aperçue par les constructeurs, savoir la valeur I_{cc} du courant de court-circuit du redresseur, qu'il est possible de relever sans dommage pour l'appareil en alimentant le primaire sous tension réduite. Enfin, l'apparition de redresseurs à grille, avec contrôle du potentiel de grille, ou thyratrons, permet d'envisager la construction, dans un avenir assez proche, de groupes réalisant la charge automatique sous courant constant. Quelques précisions sur le fonctionnement et la régulation de ces appareils sont données dans un appendice à la présente communication.

APPENDICE

CHARGE AUTOMATIQUE A INTENSITÉ CONSTANTE PAR THYRATRONS

D'une façon générale, tout redresseur muni de grilles ou de gaines d'anode dont il est possible de contrôler le potentiel par rapport à la cathode au moyen d'une source extérieure quelconque est un thyratron ; pratiquement ce sont surtout les valves type (VI) qui ont été jusqu'à présent équipées en thyratron et soumises à des essais méthodiques. Toutefois, il semble qu'on ait obtenu également des résultats intéressants avec des thyratrons dérivés d'ampoules du type (I).

Pour l'application qui nous intéresse, il suffit de rappeler la propriété essentielle de ces appareils : l'espace anode-cathode ne peut être conducteur que si la grille est portée à un potentiel positif par rapport à la cathode. Si la grille est soumise à une tension sinusoïdale déphasée par rapport à la tension de l'anode d'un angle α, cette anode ne pourra débiter que pendant les intervalles de temps où la tension grille et la tension d'anode sont simultanément positives.

La figure 11 donne le schéma d'un redresseur triphasé à thyratrons équipé avec tout l'appareillage nécessaire pour réaliser la charge à intensité constante en deux temps. Les deux organes de réglage sont :

1° l'interrupteur automatique de fin de charge (P) système Pöhler.

2° le régulateur (R).

Nous ne reviendrons pas sur la description de l'interrupteur Pöhler. Nous nous bornerons à faire remarquer que, dans le cas du présent schéma, les contacts principaux *a* et *b* servent à couper, non pas le circuit principal de charge, mais le circuit d'une bobine à minima de l'interrupteur tripolaire principal I. D'autre part, le contact auxiliaire *c* qui s'ouvre lorsque la tension de la batterie atteint 2,4 V par élément et déclenche la mise en route du dispositif horométrique, coupe en même temps la bobine du relais *r*, ce qui a pour effet d'actionner l'inverseur *i* et de faire passer l'alimentation du régulateur R du shunt S_1 (premier régime) au shunt S_2 (deuxième régime).

Le régulateur R se compose de 2 organes essentiels : un moteur *m* et un contrôleur de phases *p*, tous deux montés sur le même axe.

Le moteur, qui n'est destiné qu'à tourner d'une fraction de circonférence, peut être constitué par un petit moteur comportant un enroulement statorique et un enroulement rotorique en série. L'axe sur lequel sont calés les éléments rotoriques de *m* et *p* est soumis à l'action d'un

ressort antagoniste *s*. La rotation de l'axe est limitée entre 30° et 150° par deux butées non figurées sur le schéma.

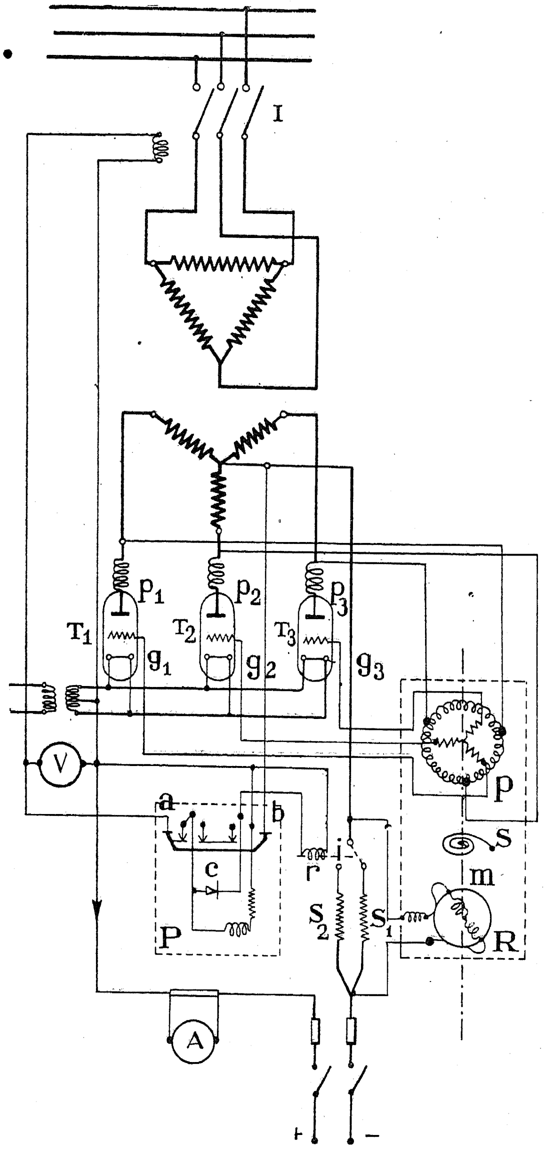


Fig. 11. — Schéma d'un redresseur triphasé équipé avec thyratrons et régulateur automatique de débit. — Charge à deux régimes à courant constant. — Passage automatique d'un régime à l'autre et arrêt automatique de fin de charge par interrupteur horo-voltmétrique (système Pöhler).

A chaque valeur du débit dans le circuit principal du redresseur correspond une valeur proportionnelle du courant dans les enroulements de *m* et, par suite, une valeur déterminée du couple développé

par m. Il en résulte que l'axe tournera d'un angle tel que la force antagoniste développée par le ressort s équilibre le couple du moteur m. En réglant la tension du ressort, il est possible de régler la valeur du courant de régime I_r qu'on veut obtenir comme valeur constante du courant de charge. Le contrôleur de phase p n'est autre qu'un petit régulateur d'induction dont le stator est excité par les tensions des anodes et dont le rotor contrôle les tensions respectives des grilles des 3 thyratrons T_1, T_2, T_3. Ces grilles ne débitant qu'un courant pratiquement nul, le contrôleur de phase ne développe aucun couple. Comme le déphasage des grilles g_1, g_2, g_3 par rapport aux plaques p_1, p_2, p_3 est entièrement déterminé par la position du rotor de p par rapport à son stator et comme cette position est déterminée elle-même, comme on l'a vu plus haut, par la valeur du débit, il en résulte que le déphasage des grilles par rapport aux plaques est une fonction bien déterminée du débit du redresseur.

Le débit I que le redresseur est en mesure de fournir sur une batterie de force contre-électromotrice donnée U diminue à mesure que α augmente; dans ces conditions, on peut en effet admettre que l'appareil soit réglé de telle sorte qu'il suffise de très petites variations du débit I autour de la valeur constante I_r choisie comme valeur de régime pour provoquer une grande rotation de l'axe R, c'est-à-dire une grande variation du déphasage U. Dans ces conditions, supposons que tout soit en équilibre à un certain état de régime et que le redresseur débite un courant I_r dans la batterie de force contre-électromotrice U, le déphasage des grilles par rapport aux anodes étant α. A mesure que la charge se poursuit, U augmente et si la tension du redresseur restait la même, I aurait tendance à diminuer. Mais dès que I commence à décroître, le déphasage des grilles 2 diminue par suite de l'action du régulateur et cette diminution du déphasage s'oppose à la réduction du débit, lequel reste donc sensiblement constant du fait que le régulateur permet de compenser l'augmentation progressive de la contre tension de la batterie par une diminution corrélative du déphasage des grilles.

Le fonctionnement d'un tel régulateur est très analogue à celui du régulateur centrifuge d'une machine à vapeur. La contre-tension de la batterie est l'analogue du couple résistant du moteur, le débit de charge est l'analogue de la vitesse angulaire de l'arbre et la tension du redresseur est l'analogue du couple moteur de la machine. L'analogie peut même être poussée assez loin, puisque les grilles des thyratrons jouent un rôle semblable à celui de la vanne commandant l'admission de vapeur. Dans les deux cas, le phénomène qu'il s'agit

de rendre aussi constant que possible est, d'une part le débit de charge, et, d'autre part, la vitesse angulaire de la machine.

La figure 12 permet de se rendre compte avec plus de précision du mode d'action de ce système de régulation. *e* représente la tension de la plaque de l'un des thyratrons. Au-dessous est figurée la courbe représentative de la tension des grilles. U_1 et α_1 représentent respectivement la contre-tension de la batterie et le déphasage des grilles au début de la charge, tandis que U_2 et α_2 représentent les mêmes quantités à la fin de la charge.

La condition que la tension moyenne aux bornes des inductances

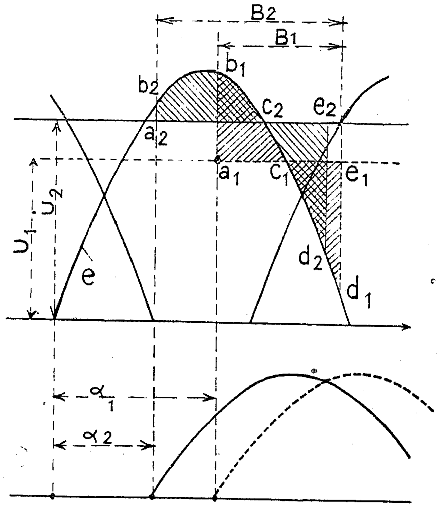


Fig. 12. — Variation de la tension aux bornes des inductances auto-régulatrices en fonction du déphasage des grilles.

autorégulatrices reste nulle, impose que la durée de la charge s'effectue, au début pendant un intervalle β_1 et à la fin pendant un intervalle β_2 tel que les aires a_1, b_1, c_1, *et* c_1, d_1, e_1 d'une part, a_2, b_2, c_2 et c_2, d_2, e_2 d'autre part, soient égales. Le rôle du régulateur de phase des grilles est de faire varier α en fonction de U de telle façon que la valeur moyenne du courant débité par chaque anode pendant l'intervalle β soit constante.

Considérons la famille des courbes de la figure 13. Chacune de ces courbes donne la variation du rapport $\frac{I}{I_{cc}}$ en fonction de α pour une valeur donnée de $\frac{U}{\sqrt{2}E}$. Autrement dit, au rapport des ordonnées près, chacune de ces courbes montre comment varie le courant

le charge I en fonction du déphasage des grilles lorsque la contre-ension U de la batterie reste constante. Remarquons que le redresseur tant supposé triphasé, α ne peut être inférieur à 30°.

D'autre part, il est évident que pour une valeur donnée de U et par onséquent de $\frac{U}{\sqrt{2}E}$ la valeur de I reste constante quelle que soit la va-eur de α pour toute valeur de α comprise entre 30° et α_0, cet angle tant celui qui correspond à la valeur de $\frac{I}{I_{cc}}$ sur le graphique le la figure 4. En effet, ce n'est que lorsque α est supérieur à α_0 que

c

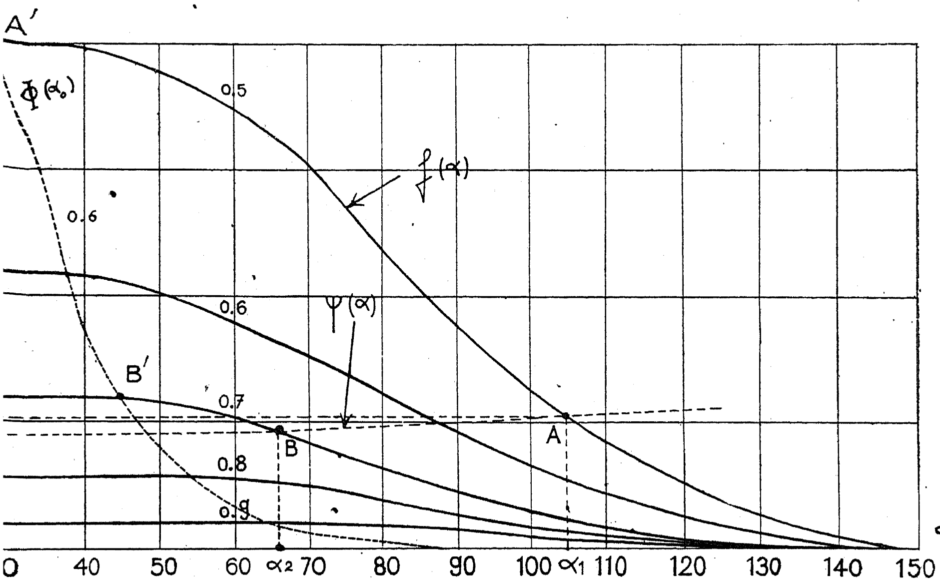


Fig. 13. — Etude graphique du système de régulation automatique par déphasage des tensions de grille.

es anodes débitent pendant un intervalle inférieur à celui pendant equel elles débiteraient s'il n'existait pas de grilles de contrôle.

Les différentes courbes donnant pour chaque valeur de $\frac{U}{\sqrt{2}E}$ la variation de $\frac{I}{I_{cc}}$ en fonction de α débutent donc par un palier horizontal d'ordonnée $\frac{I}{I_{cc}}$ correspondant à la valeur de $\frac{U}{\sqrt{2}E}$ d'après le graphique de la figure 4 et se prolongeant jusqu'à une courbe pointillée qui n'est autre qu'une transformation de ce graphique donnant la variation de $\frac{I}{I_{cc}}$ en fonction de α_0.

A mesure que α augmente, β et $\frac{I}{I_{cc}}$ diminuent. Nous n'entrerons pas dans le détail du calcul de la variation de $\frac{I}{I_{cc}}$ en fonction de α, qui peut se conduire d'une façon analogue à celle indiquée précédemment pour le calcul des inductances autorégulatrices dans la méthode à potentiel constant, $\frac{I}{I_{cc}}$ s'annule lorsque α atteint la valeur $2\pi - \alpha_0$.

Si nous supposons maintenant que le régulateur soit réglé de telle sorte que la valeur du courant de charge soit maintenue à une valeur sensiblement constante autour d'une valeur moyenne I_r, cela signifie que pour une très petite variation de I en plus ou en moins de Ir, on pourra obtenir une importante rotation de l'axe du régulateur, c'est-à-dire une grande variation de α. On appelle en général *courbe de régime*, dans un problème de régulation, la courbe qui donne les variations de la quantité qu'il s'agit de maintenir constante en fonction de la variable dont on fait dépendre artificiellement cette quantité pour compenser ses variations en fonction des variables dont elle dépend naturellement. Plus le régulateur est sensible, plus cette courbe se rapproche d'une horizontale. Dans le cas qui nous occupe, la courbe de régime sera la courbe $\frac{I}{I_{cc}} = \psi(\alpha)$ donnant les variations de $\frac{I}{I_{cc}}$ en fonction de l'angle de déphasage α imposé par le régulateur aux grilles. Elle est tracée en pointillé sur le graphique de la figure 13.

Supposons, pour fixer les idées, que la tension de la batterie U varie entre le début et la fin de la charge d'une quantité telle que la valeur du rapport $\frac{U}{\sqrt{2}E}$ passe de 0,5 à 0,7. Au début de la charge, le point de fonctionnement sera donc à l'intersection A de celle des courbes $\frac{I}{I_{cc}} = f(\alpha)$ correspondant à $\frac{U}{\sqrt{2}E} = 0,5$ et de la courbe de régulation $\frac{I}{I_{cc}} = \psi(\alpha)$. Le régulateur s'équilibrera donc sous un angle α_1, laissant passer le débit I tels que $\frac{I_1}{I_{cc}}$ et α_1, soient les coordonnées du point A. A mesure que la charge se poursuivra, U et par suite $\frac{U}{\sqrt{2}E}$ augmentera et le point figuratif décrira la courbe $\psi(\alpha)$, de façon à rester toujours à l'intersection de cette courbe et de la courbe $\frac{I}{I_{cc}} = f(\alpha)$ correspondant à la valeur de $\frac{U}{\sqrt{2}E}$ à l'ins-

tant considéré. A la fin de la charge, le point figuratif arrivera donc en B, intersection de la courbe de régime avec la courbe $\frac{I}{I_{cc}} = f(\alpha)$ correspondant à $\frac{U}{\sqrt{2}E} = 0,7$. A ce moment, les coordonnées de B étant $\frac{I_2}{I_{cc}}$ et α_2, le régulateur se sera équilibré sous un angle α_2, le courant débité étant I_2. On voit qu'avec un régulateur sensible dont la courbe de régime se rapproche suffisamment de l'horizontale, les valeurs de I_1 et I_2 seront très peu différentes de la valeur moyenne I_r choisie comme valeur de régime. Sans le régulateur, le point figuratif se serait déplacé sur la courbe $\frac{I}{I_{cc}} = \Phi(\alpha_0)$ entre les points A′ et B′, et le courant serait passé de la valeur I'_1, à la valeur I'_2, correspondant aux ordonnées respectives de A′ et B′, valeurs qui peuvent être considérablement différentes.

Pour passer d'un régime de charge à un autre, c'est-à-dire pour changer la valeur de I_r, il suffit de changer la valeur du shunt du régulateur (1).

Dans le cas d'une batterie fer-nickel, le schéma se simplifierait, puisqu'on adopterait une seule valeur de régime. Un seul shunt suffirait et le relais voltmétrique permettant de passer d'un shunt à l'autre deviendrait inutile. Le dispositif d'arrêt automatique de fin de charge pourrait être un dispositif ampèreheuremétrique genre Sangamo.

Le système se prêterait également à la charge mixte en deux temps. Le schéma serait analogue mais on n'utiliserait qu'un seul shunt. Le relais voltmétrique servirait à mettre en circuit ou hors circuit le régulateur. Au-dessous de 2,4 V par élément, le redresseur charge la batterie sous potentiel constant, et au-dessus, par suite de l'intervention du régulateur, à courant constant, la valeur de ce courant étant déterminée par celle du shunt.

D'autres régulateurs que celui décrit ci-dessus ont été proposés et même essayés avec succès. M. Toulon, en particulier, a proposé de commander le déphasage des grilles par des condensateurs variables du genre de ceux employés en radioélectricité. Il est aisé d'obtenir une importante rotation de ces condensateurs pour une faible variation du courant débité, grâce à un dispositif analogue à celui des appareils de mesure thermiques : un fil, par sa dilatation, provoque une rotation plus ou moins grande de l'armature mobile des con-

(1) On peut également changer la tension du ressort antagoniste.

densateurs. Le dispositif est réglé de telle sorte qu'une augmentation de débit entraîne une augmentation de la température de régime de fil, donc une dilatation, laquelle à son tour provoque une rotation de l'armature mobile des condensateurs variables telle que l'augmentation corrélative du déphasage des grilles s'oppose à l'augmentation du débit (1).

Le dispositif précédemment décrit peut être simplifié en rassem-

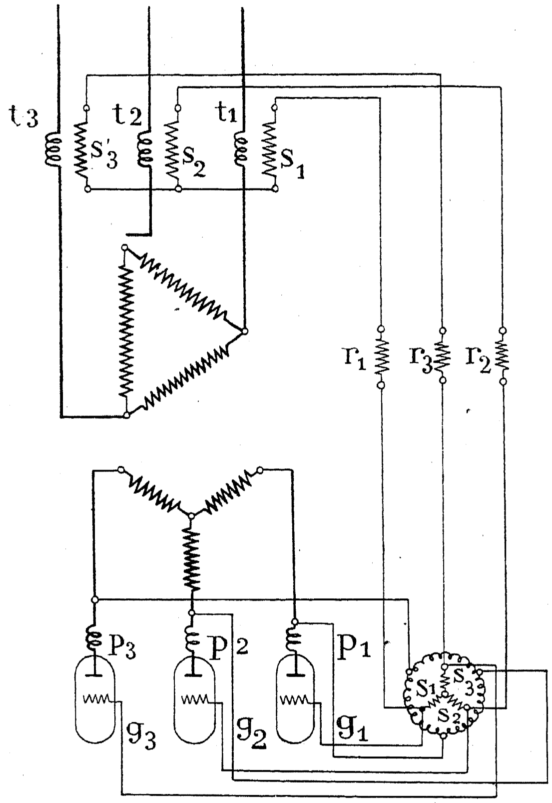


Fig. 14. — Variante du système régulateur de débit de la fig. 11.

blant dans un même organe le moteur et le contrôleur de tension de grilles. On utilise à cet effet un petit moteur asynchrone à rotor bobiné du même genre que celui qui jouait le rôle du contrôleur de tension dans le dispositif précédent. Mais les phases de l'enroulement

(1) M. Toulon a réalisé cette expérience avec un redresseur à vapeur de mercure ordinaire, muni non pas de grilles internes, mais de gaines externes placées sur les bras d'anode. Il paraît nécessaire toutefois, pour éviter un contrôle erratique du débit par les gaines de maintenir constante la température des bras de l'ampoule en immergeant celle-ci dans l'huile.

induit, au lieu d'être connectées seulement aux grilles des thyratrons sont également reliées aux secondaires de transformateurs série insérés dans les lignes alimentant le primaire du redresseur. Lorsque le courant débité par ce dernier diminue, les tensions développées dans les secondaires des transformateurs série diminuent. Comme ces tensions avaient tendance à s'opposer aux tensions développées dans l'induit du régulateur, la force électromotrice résultante développée dans ces enroulements augmente, le courant augmente et le couple augmente, ce qui fixe une nouvelle position d'équilibre du régulateur, c'est-à-dire un nouveau déphasage des grilles sur les plaques ayant tendance à s'opposer à la variation de débit. On comprendra mieux le mode d'action de ce nouveau dispositif en se reportant à la figure 14.

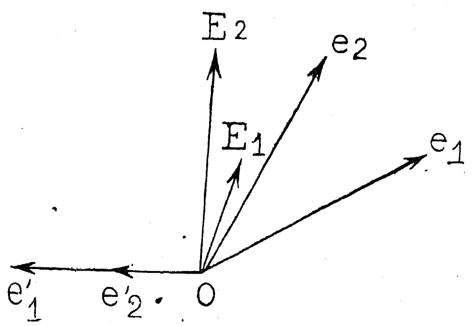


Fig. 15. — Diagramme des tensions développées dans les enroulements du système régulateur de la fig. 14.

Les secondaires s_1, s_2, s_3 de l'induit du régulateur sont connectés respectivement aux grilles g_1, g_2, g_3 des thyratrons et aux secondaires s'_1, s'_2, s'_3 des transformateurs série t_1, t_2, t_3 branchés sur le primaire. Le courant de circulation entre les secondaires est limité à une valeur admissible par les résistances r_1, r_2, r_3. La figure 15 donne le diagramme des tensions qui se développent dans les enroulements s_1, s_2, s_3, s'_1, s'_2, s'_3 ; soit e_1 et e'_1 les vecteurs représentant les tensions qui se développent respectivement dans s_1 et s'_1 pour une certaine valeur du débit. La tension résultante provoquant la circulation du courant dans les enroulements et par conséquent déterminant la valeur du couple sera E_1. Si le débit diminue, la tension développée dans le secondaire du transformateur série diminue et devient e'_2. Le régulateur passe à une nouvelle position d'équilibre et l'on peut caler le rotor de telle façon sur l'axe, que sa rotation diminue le déphasage entre les tensions développées dans l'induit du régulateur et celles développées dans les transformateurs série. La tension développée dans

le régulateur deviendra donc e_2 et la tension résultante E_2. Cette dernière tension est plus grande que E_1 pour la double raison que la valeur de la force contre-électromotrice développée dans les secondaires des transformateurs série diminue et que le déphasage entre ces tensions et celles développées dans l'induit du régulateur diminue également. Il en résulte que le courant développé dans cet induit augmente, que le couple augmente également et que le régulateur s'équilibre dans une nouvelle position correspondant à un plus grand déphasage des grilles par rapport aux plaques, ce qui a pour effet de s'opposer à la diminution de débit.

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DU CHOIX DES MODES D'EXCITATION DES DYNAMOS EN TRACTION ÉLECTRIQUE A COURANT CONTINU INTRODUCTION A LA RÉGULATION ÉCONOMIQUE DE LA VITESSE (1)

par M. GRATZMULLER,

Ingénieur-Conseil.

Introduction. — Généralités sur la régulation, réglage par la tension, par le champ, par les deux procédés combinés; encombrement et poids des moteurs. — Dynamos à caractéristique série : excitation série-directe, propriétés; excitation série-indirecte. — Dynamos à caractéristiques shunt ou séparée; propriétés. — Dynamos à caractéristique compound, moteur compound direct; indirect; excitation compound semi directe. — Conclusion.

I. — INTRODUCTION.

Le courant continu prend une part de plus en plus grande en traction électrique.

Il s'harmonise d'une manière heureuse avec la distribution triphasée, il se prête d'une manière particulièrement satisfaisante au réglage de l'effort de traction en grandeur et en signe et, par suite, à celui de la vitesse et de l'accélération positive ou négative, sans perte d'énergie notable en chaleur dans des rhéostats ou des freins mécaniques.

Le collecteur, *organe d'asynchronisme* par excellence, se comporte tout spécialement avec souplesse en courant continu *à toutes vitesses.* C'est la thèse générale que nous avons développée, d'abord à la séance du 28 novembre 1930, commune à la S. F. E. et à la Société des Ingénieurs Civils, puis, sous une forme un peu différente, au Congrès des Grands Réseaux, en juin 1931.

En France, on a adopté la tension de 1 500 V pour la traction d'intérêt général. Chose curieuse, on a souvent choisi aussi 1 500 V par collecteur, tension difficile pour obtenir une bonne commutation,

(1) Cette communication sera discutée à la Semaine de novembre 1931.

tout au moins en 1920. Mais maintenant, on sait obtenir de bonnes commutations avec 1 500 V et plus, par collecteur, sans dangers d'arcs entre balais (1). Toutefois, l'évolution tend parfois à diminuer la tension par collecteur en disposant toujours plusieurs induits en série par dérivation sur le réseau.

Après avoir judicieusement abaissé la tension par collecteur à 750 V dans ses premières locomotives à 1 500 V, le P. L. M. a abaissé la tension par collecteur à 500 V dans ses dernières. Il est vrai que le bénéfice de la multiplicité des couplages avec nombreuses vitesses économiques a été obtenu. Or, la difficulté de la haute tension à courant continu est due principalement à l'élévation de la tension tolérée par collecteur.

M. Boucherot fit partie de la commission ministérielle de 1920, qui choisit le 1 500 V pour l'électrification des chemins de fer français d'intérêt général. M. Boucherot, alors conseil à la Société Alsacienne, m'ayant fait l'honneur de causer avec moi à ce sujet, nous étions tombés d'accord que la tension de 1 500 V était trop basse. Néanmoins, pour ne pas reculer encore les débuts de l'électrification et ne pas remettre tout en question, M. Boucherot a convenu qu'il signalerait à la Commission l'opportunité de réserver, d'élever ultérieurement à la tension au moins à 3 000 V. Je crois même que M. Boucherot a parlé de 6 000 V à la Commission, ce qui me semble un peu élevé. La tension de 4 500 V me paraît pratique dans l'état actuel de la technique pour les très grandes distances, et la tension de 3 000 V aurait été suffisante en France.

Rappelons encore l'intérêt des sous-stations par convertisseur à vapeur de mercure par l'emploi desquels nous envisagions, dès 1913, *la justification dans l'avenir* de la traction à courant continu.

Ces quelques remarques préliminaires d'introduction faites *pour justifier l'étude un peu longue qui suit, mais que nous croyons nécessaire*, pour tâcher d'éviter des controverses interminables, nous allons aborder le choix du mode d'excitation des moteurs. Notre désir est de provoquer une discussion que nous croyons fondamentale sur les phénomènes essentiels que nous nous sommes efforcés de dégager.

Nous ne reviendrons pas sur l'historique des hésitations à ce sujet de la période héroïque du début. D'ailleurs, l'ouvrage remarquable de M. Blondel, datant de 1898, mais où l'on trouve encore traités

(1) Voir la théorie de l'auteur sur l'arc entre balais : *Bulletin S. F. E.* du 31 janvier 1913. [Rappel d'une théorie générale de la commutation]. *Bulletin S. F. E.*, septembre 1926 (Production des arcs dans le matériel de traction à courant continu)

des points d'une actualité surprenante, expose les principales premières tentatives.

Nous nous bornerons donc à des considérations tirées de l'évolution de ces trente dernières années. Successivement, seront envisagées les excitations à *caractéristiques* série, séparée et compound avec leurs avantages et leurs inconvénients et *surtout leurs applications essentielles qui nous en semblent la conséquence.*

Dans le rapport sur le freinage à courant continu sur pente, paru au *Bulletin S. F. E.* d'octobre 1929, nous avons justifié, croyons-nous, le rôle des résistances stabilisatrices, mises en série avec les induits des dynamos, pour limiter les surintensités, et nous avons donné les principes de variantes plus ou moins heureuses. L'étude qui suit aboutira à la réduction ou même à la suppression des résistances stabilisatrices.

II. — GÉNÉRALITÉS SUR LA RÉGULATION DE LA VITESSE.

Les points de vue envisagés seront applicables, soit à la marche motrice seule, cas le plus fréquent pour le moteur série par exemple, soit à la fois à la marche motrice et génératrice des dynamos. Ils sont valables, en principe, quels que soient les modes d'excitation des moteurs et seront invoqués dans la suite.

On doit remarquer que la chute ohmique due aux moteurs dans la dérivation sur le réseau U de tension U est faible, soit de quelques centièmes de U seulement. Il faut, pour parvenir à la marche motrice ou génératrice, modifier la force électromotrice e de l'induit pour satisfaire à la relation.

(1) $$U = e \pm (r + R)\, i = K\, \Phi\, N \pm (r + R)\, 2$$

N est le nombre de tours d'induit par seconde, r est la résistance ohmique des moteurs, elle peut représenter soit la résistance d'induit seulement, ou la résistance de l'induit et de l'inducteur ou d'une partie de celui-ci, soit la somme des mêmes éléments pour plusieurs moteurs en série dans une dérivation sur le réseau U, e représente alors la somme des forces électromotrices, K est une constante de construction.

R est une résistance plus ou moins heureusement introduite qui sera une résistance supplémentaire limitant les surintensités et qui sera, soit la résistance du début du démarrage, soit la résistance que nous avons appelée stabilisatrice en récupération et qu'il importe

de réduire ou de faire disparaître. Trois grandes méthodes générales apparaissent comme conséquences de la relation (1).

1° Réglage par la tension ; 2° réglage par le champ ; 3° réglage à la fois par la tension et par le champ.

1° *Réglage par la tension.* — Elle consiste à varier la tension disposée aux bornes d'un moteur ou d'un groupe de moteurs en série. Mentionnons les solutions connues.

1° Par transformateur, moteur général tournant (Ward Léonard), le réglage est progressif et parfait, mais le poids est trop élevé, car la puissance totale mise en jeu par le transformateur est plus grande que la somme des puissances des moteurs. On y reviendra peut-être un jour si l'on parvient à réduire beaucoup le poids du matériel tournant. Mais c'est une solution très éloignée. On peut freiner jusqu'à l'arrêt.

2° Par l'utilisation des tensions aux bornes secondaires d'un diviseur de tension ou égalisatrice (Ferrand et Julin, Somajní, Della Riccia). Mais les variations de tension sont obtenues d'une manière discontinue.

Elle peut être progressivement variable (Della Riccia) mais, tout réglage progressif semble ou délicat ou compliqué.

A remarquer que, sauf dans le réglage Della Riccia, ou d'autres que l'on peut imaginer, des résistances de passage sont généralement utilisées ou proposées. Elles représentent des pertes du même ordre que celles nécessaires dans les changements de couplage de moteurs, dans le cas où le nombre d'induits du diviseur de tension est égal au nombre maximum de moteurs par dérivation ou encore au nombre maximum d'unités motrices par dérivation dans la régulation par changement de couplages, une unité motrice étant constituée par plusieurs moteurs dont les induits sont invariablement en série.

A noter que, si les moteurs ont un enroulement inducteur série seul ou composé d'une façon quelconque avec une excitation shunt, les transitions ou le réglage de la vitesse se feront aussi partiellement avec variation du flux ou de la force électromotrice e des moteurs.

3° On peut utiliser un groupe moteur-générateur fonctionnant en survolteur dévolteur de la tension du réseau. C'est la solution expérimentée sous le nom de système Star par les Forges et Ateliers de Jeumont, en 1913, au Métropolitain de Paris. Elle permet de freiner aussi jusqu'à l'arrêt comme le Ward-Léonard, mais elle nécessite

une puissance en jeu de groupe tournant égale à la puissance totale des moteurs. Elle paraît encore un peu lourde.

4° On peut transformer sur le véhicule la distribution à tension U du réseau approximativement constante en distribution série à courant approximativement constant, dans laquelle on intercale moteurs ou génératrices excitées en série suivant les idées générales de MM. Thury et Boucherot. C'est l'idée générale dont M. Pestarini a trouvé une réalisation si originale.

Les difficultés de commutation sont alors reportées des dynamos principales au transformateur qui fournit la tension variable.

5° Enfin, il importe de mentionner la méthode de régulation par changement du nombre de moteurs en série par dérivation sur le réseau. Ce n'est, en effet, qu'un mode de régulation par la tension qui se combine plus ou moins avec un réglage par le champ.

Une remarque s'impose. Dans les changements de couplage par moteur, s'il y a n moteurs et si l'on veut que, toutes choses égales, les tensions mises en jeu, ou approximativement, les vitesses soient proportionnelles à 1, 2, ...M, il faut que n soit un nombre entier multiple de 1, 2, ...M, c'est-à-dire que n soit au moins le plus petit multiple de 1, 2, ...m. De là, l'intérêt de disposer parfois d'un grand nombre de moteurs.

2° *Réglage par le champ.* — Rappelons la relation fondamentale

$$e = K\Phi N. \qquad (2)$$

N est le nombre t./s. de l'induit, K une constante de construction, Φ, *le flux utile* par moteur commun à l'inducteur et à l'induit.

Remarquons immédiatement que pour que le réglage de la vitesse soit progressif, sans intercalation de résistances stabilisatrices, il faut que Φ varie progressivement. La self-inductance des inducteurs jouera favorablement à ce point de vue dans certains cas, ce qui compensera partiellement d'autres inconvénients dans d'autres cas..

3° *Enfin, on peut combiner* les 2 méthodes, réglage par le champ et réglage par la tension, soit dans la marche motrice seule, soit dans le freinage avec récupération (1).

Encombrement et poids des moteurs. — L'encombrement et le poids des dynamos est déterminé, d'une part par le couple à obtenir,

(1) Guéry, *Technique Moderne*. Le freinage rhéostatique et le freinage récupérateur en traction électrique, t. XX, n° 15, 1er août 1928.

d'autre part, en supposant le couple constant, par la variation de vitesse réalisée par la variation du flux.

En effet, le couple est donné par la formule

(3) $$C = \lambda \Phi i$$

Φ est le flux utile produit par l'enroulement inducteur à travers l'induit, et λ une constante de construction.

Nous avons supposé le couple constant pour faciliter la comparaison. D'ailleurs, cette condition correspond au cas du Métropolitain. De plus, nous négligerons les chutes ohmiques des résistances r. D'après (3), le produit du flux Φ par l'intensité doit rester constant, d'après (1), la vitesse varie en raison inverse du flux.

De là résulte :

A couplage constant, si la vitesse doit varier de 1 à 4, le flux doit varier de Φ à $\frac{\Phi}{4}$ et pour que le couple reste constant, il faut que le courant, dans l'induit, varie de i à $4i$.

De sorte que le circuit magnétique du moteur doit être prévu pour le flux Φ et le cuivre de l'induit pour le courant $4i$.

De même pour la surface frottante des balais sur le collecteur.

Supposons, au contraire, que la tension par moteur varie de U à $\frac{U}{2}$ par couplage série-parallèle, par exemple. La variation de vitesse de 1 à 4 peut être obtenue en faisant varier seulement le flux par moteur de Φ à $\frac{\Phi}{2}$ d'abord pendant le couplage série, ce qui procure une variation de vitesse de 1 à 2, puis, pendant le couplage parallèle, le flux peut varier encore de Φ à $\frac{\Phi}{2}$ et la vitesse varie de 2 à 4.

Quant au courant, pour avoir couple constant, il doit varier de i à $2i$ dans le 1er couplage, puis encore de i à $2i$ dans le 2e.

Au total, en admettant le couplage série-parallèle, les moteurs doivent être dimensionnés pour recevoir le flux maximum Φ et le courant $2i$. Le cuivre, dans l'induit par couplage série-parallèle, doit donc être prévu pour un courant maximum moitié de celui prévu pour couplage unique. De même, pour la surface frottante des balais sur le collecteur.

Bien entendu, l'appareillage nécessaire pour le changement de couplage sera plus compliqué. Mais la réduction du poids et l'amélioration des conditions de fonctionnement des moteurs sont incontestables.

Nous reviendrons plus tard sur les modalités et la distinction

nécessaire de la marche motrice et de la marche génératrice ou de freinage. Nous pouvons cependant indiquer, dès à présent, que pour la marche génératrice ou de freinage, toutes les pertes par frottements, hystérésis, courant de Foucault, augmentent la puissance de freinage et diminuent, au contraire, la puissance motrice dans la marche motrice. D'où la réduction des courants i lors de la marche de freinage d'autant plus que le flux Φ est accru parce que la tension U s'élève généralement par suite de l'inversion de la chute de tension en ligne.

Ces généralités exposées, nous passons aux différentes caractéristiques d'excitation.

Pour chacune, nous examinerons successivement (α) les régimes réguliers ou quasi-stationnaires correspondant à la variation lente de la tension U du réseau, puis (β) les régimes transitoires dus aux variations brusques de U.

III. — Dynamos a caractéristique série.

Deux modes d'excitation permettent d'obtenir la caractéristique série en régime régulier, mais leurs propriétés en régime transitoire sont tout à fait différentes.

a) *Excitation série-directe.* — Après quelques hésitations, l'idée la plus générale d'excitation des moteurs de traction fut de mettre l'induit directement en série avec les inducteurs (fig. 1).

A chaque instant, le courant dans les inducteurs est égal au courant i de l'induit. Il en résulte les propriétés bien connues suivantes, d'abord en régimes réguliers :

1° *Indépendance du couple et de la tension U.* — Le couple est à peu près indépendant de la tension U du réseau puisque, pour obtenir le couple, il suffit que la tension d'alimentation puisse égaler les chutes ohmiques de tension. La vitesse sera alors petite si U est petit. Il y a donc facilité pour obtenir de très grands couples, même avec chutes de tensions très importantes.

2° *Robustesse des enroulements inducteurs.* — Leur encombrement est réduit par suite de la section relativement grande du conducteur et de la place réduite prise par les isolants entre spires.

3° *Propriété de limitation partielle des surintensités dangereuses, production de très grands couples.* — Dans une certaine mesure, les surintensités sont limitées puisque le flux augmente avec le courant i. D'où aussi la possibilité d'obtenir de très grands couples,

temporairement, puisque dans le produit Φi, les 2 facteurs augmentent avec i.

4° *Mise en parallèle, sur le réseau, de plusieurs dérivations contenant des moteurs.* — Elle est obtenue pour la même raison avec une certaine autorégulation de la répartition de courants peu différents dans les dérivations. Pour la même raison, on bénéficie d'un minimum du nombre de crans du rhéostat de démarrage et de facilités

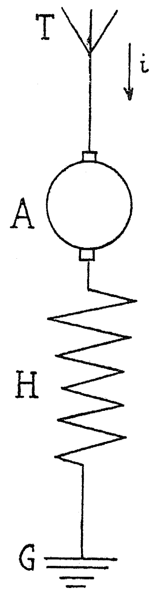


Fig. 1. — Moteur série directe.

dans le passage de la marche série à la marche en parallèle. *Ceci est un avantage considérable si l'on adopte le passage de la marche série à la marche en parallèle* pour la marche motrice. Mais, dans les changements de couplages, interviennent les propriétés du moteur série-directe en régime transitoire examiné plus loin.

5° *Commutation aux collecteurs.* — On invoquait la bonne commutation du moteur série-direct, surtout à l'époque héroïque du début, par suite du rapport constant entre ampères-tours inducteurs et ampères-tours d'induit. Les pôles de commutation (Picou) ont permis de s'affranchir de cette condition.

6° *Emballement aux faibles couples.* — S'il y a bénéfice aux grands couples avec le moteur série-directe, il y a un inconvénient aux faibles couples, parce que le moteur tend à s'emballer. D'où la néces-

sité de procéder par coupures, puis rétablissements successifs du courant dans les moteurs.

7° *Marche en génératrice.* — La dynamo série ne se prête pas à la marche en génératrice. C'est un inconvénient grave qui, jusqu'à ces derniers temps, a prohibé la récupération. D'abord, il faut permuter les entrées et sorties dans induits ou inducteurs pour obtenir l'amorçage, mais, après la délicatesse du couplage sur le réseau, supposée résolue, si pendant un instant la tension du réseau devient supérieure à celle de la force électromotrice totale des induits d'une dérivation sur le réseau, le courant change de sens dans les dynamos, entraînant le changement de signe du flux et la force électromotrice totale des dynamos s'ajoute alors à celle du réseau pour faire un véritable court-circuit très violent.

Seule, une distribution série à courant continu, approximativement constant, soit sur l'ensemble du réseau, soit sur la locomotive, permet d'utiliser les dynamos série au freinage avec récupération.

8° *Freinage rhéostatique.* — On peut freiner par fermeture des circuits électriques des dynamos sur résistances. C'est le freinage dit rhéostatique avec dissipation complète de l'énergie sous forme de chaleur gênante et poids encombrant des résistances.

On signale un phénomène singulier, décrit par M. Guéry par note à la S. F. E. (4e Section), en avril 1931, puis note de M. Bacqueyrisse, en mai 1931. Il arrive que, lors d'un patinage au freinage rhéostatique, le rotor se bloque pendant plusieurs secondes, c'est-à-dire ne tourne plus. C'est un incident secondaire qui provient d'une mauvaise conduite ou d'une division insuffisante du rhéostat de réglage. Le maintien, pendant un certain intervalle de temps, du couple de blocage, est certainement dû au courant produit par l'énergie électromagnétique accumulée dans les inducteurs, énergie magnétique qui se transforme progressivement en chaleur dans les résistances du circuit électrique.

Le blocage, c'est-à-dire l'égalité du couple moteur et du couple résistant, prolongé quelques secondes, doit pouvoir s'expliquer : 1° par une discontinuité du coefficient de roulement ; 2° par une discontinuité de ce que j'ai appelé la période de restitution en commutation.

Dans le freinage rhéostatique, la faculté de la dynamo série d'augmenter le flux Φ avec le courant i d'induit peut conduire à des surtensions et des surintensités dans les moteurs et précisément au patinage. Je ne les ai jamais rencontrées dans de nombreuses applica-

tions probablement parce que, le redoutant, j'ai eu recours à des rhéostats très divisés et que j'ai insisté sur la nécessité de la diminution progressive de la résistance. Cela exige une discipline du personnel.

Mais cet incident peut se produire et c'est probablement le motif qui, jusqu'à ces dernières années, a souvent fait renoncer au freinage rhéostatique en Amérique et par suite en France. Mais il était employé partout ailleurs, par exemple en Suisse et en Allemagne.

A noter également un autre incident :

Si l'on fait débiter les induits en parallèle sur un même rhéostat, les flux n'étant pas identiques dans les moteurs en parallèle, il peut y avoir débit d'un induit sur l'autre ou tout au moins mauvaise répartition des courants.

Une étude a été faite à ce sujet par M. Guéry (1).

Pour éviter cela, un moyen radical est de ne pas faire débiter les induits en parallèle sur un même rhéostat, mais d'adopter 2 circuits distincts possédant chacun leur rhéostat (2).

9° *Régime transitoire.* — C'est lors du régime transitoire qu'est la propriété peut-être la plus remarquable de l'excitation série-directe, et c'est cette propriété qui a motivé principalement notre étude. Le moteur série-directe limite automatiquement les surintensités lors des régimes transitoires.

On invoque généralement comme explication que la surintensité est limitée par la variation du flux Φ et par suite de la force contre-électromotrice de l'induit. *L'explication nous paraît insuffisante.*

Il importe de faire une remarque fondamentale :

Un moteur série de commutation délicate commute d'autant mieux, d'ailleurs comme tout moteur, si le circuit magnétique est très fortement saturé. Dans ces dernières années, un constructeur étranger, poussant les choses à l'extrême, réduisant fortement le régime unihoraire ou continu de moteurs de traction à 1 500 V par excès des pertes Joules dans les inducteurs, puis, hystérétiques et par courants de Foucault. Les pôles auxiliaires permettent précisément de s'affranchir de cette condition avec, au besoin, un léger accroissement de l'entrefer ou autres dispositions. Quoi qu'il en soit, ce qu'il faut retenir comme résultat brutal, c'est que la *saturation très poussée, conduisant à une variation très petite du flux lors*

(1) Académie des Sciences : Sur une propriété curieuse d'un montage spécial des machines électriques excitées en série. C. R. 19 juin 1922.

(2) Guéry : *Industrie des voies ferrées et des transports publics automobiles.* Etude sur la stabilité dans le montage zig-zag des moteurs de traction : février 1923.

d'une surtension très rapide ΔU, *soit avec grande dérivée* $\frac{dU}{dt}$, *n'empêchait pas les moteurs d'être le siège de surintensités très limitées ou tout au moins* $\frac{dI}{dt}$ *de rester petit.*

Pourtant, les courants de Foucault dans le circuit magnétique de la carcasse en acier coulé s'opposent aux variations *rapides* du flux φ commun à l'inducteur et à l'induit et, par suite, à l'accroissement rapide $\frac{de}{dt}$ de la force contre-électromotrice de rotation de l'induit.

Nous croyons que la force contre-électromotrice quasi-instantanée, intervenant tout à fait au début de la variation de ΔU *dans le régime transitoire rapide pour limiter le courant, est due à la self-inductance du flux de fuite des inducteurs entre inducteurs et induit.*

A cette self-inductance il faut ajouter la self-inductance de fuite entre induit et pôles auxiliaires, puis la même self-inductance de fuite des pôles auxiliaires. Mais ces dernières self-inductances de fuites, se retrouvent dans le moteur série-indirecte et les moteurs shunt ou compound.

On sait que le coefficient d'Hopkinson, rapport du flux total dans les inducteurs au flux envoyé dans l'induit, peut atteindre environ 1,25. Le flux de fuite dont la réluctance, dans sa plus grande partie, est due aux lignes de force dans l'air, correspondant à un flux peu variable avec la saturation. Elle peut donc jouer un rôle important pour limiter les surintensités au début, malgré l'opposition des courants de Foucault aux variations rapides de Φ.

C'est ce que nous voulions établir comme explication des faits constatés par une longue pratique en exploitation.

C'est une propriété fondamentale de la mise en série directe de l'inducteur ou d'une partie de celui-ci avec l'induit et qui facilite les changements de couplage entre moteurs. Bien entendu, dans le cas d'un circuit magnétique entièrement feuilleté, l'explication par la variation rapide du flux inducteur suffit.

b) *Excitation série-indirecte.* — (α) *En régime régulier,* la même caractéristique de circuit magnétique, soit Φ (*i*), que par le procédé *a*, peut être obtenue au moyen d'une excitatrice *ab* (fig. 2) des inducteurs H du moteur A, excitée elle-même par le courant *i* de l'induit A, ou une fraction de celui-ci au moyen *de l'enroulement ef*. Le courant *i* de l'induit A du moteur principal, traverse les inducteurs *ef*

de l'excitatrice d'induit *ab* donnant une tension *e ab* sensiblement proportionnelle ou tout au moins croissante avec *i*. Le courant I est proportionnel approximativement à *i* si le circuit magnétique de l'excitatrice *ab* n'est pas saturé.

(β) *Régime transitoire.* — Mais il y a une grosse différence avec la série-directe lors d'une variation brusque de U. La self-inductance totale des inducteurs H, c'est-à-dire, fuites comprises, joue pour

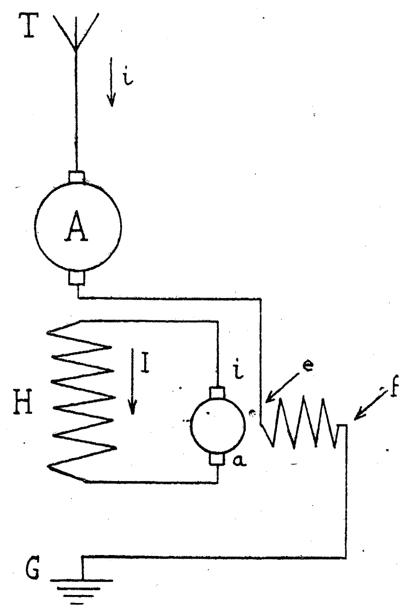


Fig. 2. — Moteur série indirecte.

retarder l'établissement du flux utile du moteur A, de sorte qu'une grande surintensité Δi se produira dans A.

c) *Excitation série semi-directe.* — Elle consiste à conserver l'enroulement K de la figure 1 traversé par le courant *i* puis, en plus, l'enroulement H excité par excitatrice *ab* comme à la fig. 2, avec enroulement inducteur traversé par le courant *i*.

IV. — Dynamos a caractéristiques shunt ou séparée.

Les inducteurs sont excités sous une tension réglable qui ne dépend sensiblement pas du courant de l'induit A. On peut exciter les inducteurs H du moteur sous la tension U du réseau ou sous une fraction *m*U de celle-ci quelle qu'en soit la source, par exemple une excita-

trice excitée et entraînée d'une manière quelconque, une batterie d'accumulateurs, etc. (fig. 3).

Mais la self-inductance totale de l'enroulement H agit d'une manière défavorable pour retarder l'établissement du flux.

Elle a plusieurs graves inconvénients et quelques avantages :

1° Invariance à peu près complète des ampères-tours inducteurs avec le courant d'induit i. Le courant i par dynamo peut croître considérablement avec $\triangle U$, la force électromotrice étant à peu près constante.

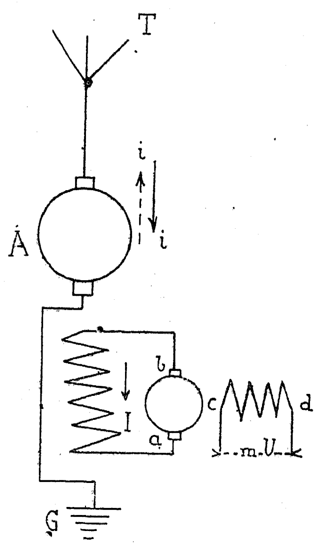


Fig. 3. — Moteur shunt ou séparée.

2° Cette invariance de Φ avec $\triangle i$ empêche l'égale répartition approximative des courants i entre les différentes dérivations sur le réseau comportant des dynamos qui ne peuvent être tout à fait identiques.

3° Si l'on veut changer le nombre des induits A par dérivation sur le réseau, il faut intercaler une forte résistance stabilisatrice de transition, même avec U constant, pour obtenir l'intervalle de temps nécessaire à l'ajustage de l'excitation à la nouvelle valeur convenable ou permettre à la vitesse N d'acquérir la nouvelle grandeur.

4° La fragilité d'un enroulement en fil fin, si la tension d'excitation est U et l'encombrement dû aux isolants entre spires de fil fin.

Cet inconvénient est limité avec les moteurs entièrement suspendus.

5° D'ailleurs, même à U constant et avec l'intervalle de temps

nécessaire, l'ajustage de la nouvelle excitation serait chose très délicate à cause des trois premiers défauts.

Mais il y a une propriété très intéressante de la caractéristique shunt ou séparée.

6° Par simple augmentation de l'excitation, à U supposé constant, la dynamo peut passer de la marche motrice à la marche génératrice et inversement. En pratique cependant, le réglage serait délicat à cause des difficultés 1, 2, 3. Il faudrait une forte résistance stabilisatrice par dérivation comportant une ou plusieurs dynamos en série, dans le cas de plusieurs dérivations de moteurs sur le réseau.

7° La vitesse peut être maintenue, à un glissement près, avec U constant, quelle que soit la charge.

8° Dans une certaine mesure, l'excitation séparée facilite la coupure du courant sur les moteurs. En effet, elle s'oppose à l'élévation de la tension entre les points de rupture.

Ce sont les propriétés 6 et 7 qui feront introduire partiellement des excitations séparées dans une excitation composite. Mais les défauts 1, 2, 3, 4 et 5 prohibent la caractéristique purement shunt sur les réseaux de traction où la tension U essentiellement varie de 15 à 20 centièmes et plus par rapport à la valeur moyenne. Les nouveaux règlements en élaboration prévoient même les limites de 0,8 U moyen à 1,3 U moyen.

En résumé, si l'excitation shunt a certaines propriétés très intéressantes, seule, elle est à éliminer en traction, et nous n'en parlerons plus.

V. — Dynamos a caractéristique compound.

a) *Moteur compound direct.* — Les inducteurs sont divisés en 2 parties (fig. 4). L'une, k, est en série-directe avec l'induit et par suite en gros conducteur, l'autre H est en fil fin et peut procurer une excitation réglable sous le courant I fourni par la tension U du réseau ou sous une fraction mU de cette tension réglable prise à une source quelconque. La section du fil peut alors être choisie arbitrairement.

La pratique a confirmé que le fonctionnement est satisfaisant, même sur un réseau à sautes brusques de tension.

L'enroulement série k n'a pas besoin d'avoir une importance considérable.

Supposons le fonctionnement au régime unihoraire, en marche motrice. Si la fraction α des ampères-tours totaux inducteurs appar-

tient à l'enroulement k, nous dirons qu'il y a α ampères-tours série. Un léger shuntage de l'enroulement k peut être nécessaire pour obtenir les grandes vitesses. Le moteur bénéficie, dans une certaine mesure seulement, des propriétés du moteur série et d'autant plus que α est plus grand et aussi dans une certaine mesure des propriétés du moteur shunt, mais aussi d'avantages qui ne possèdent ni l'un ni l'autre. Passons rapidement l'examen des propriétés en nous référant aux titres et numérotages utilisés pour le moteur série-directe.

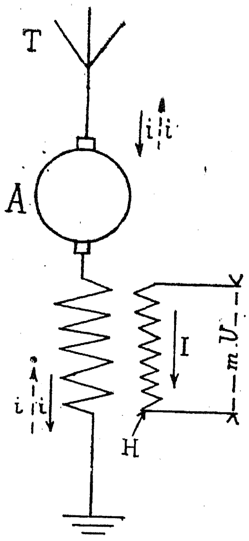


Fig. 4. — Moteur compound-directe.

1° *Indépendance du couple et de la tension du réseau. Facilité d'obtention de très grands couples.* — Ces propriétés ne sont que partiellement conservées, puisqu'une partie seulement des inducteurs est excitée en série. Si l'excitation des inducteurs H se fait sous la tension U, elle diminue avec celle-ci. Le moteur série-directe conserve sa supériorité pour obtenir les très grands couples.

2° *Robustesse des enroulements.* — Elle n'est conservée que pour l'enroulement inducteur série k, si l'enroulement H est excité par le réseau. Si H est excité par une source convenable, il peut être fait en gros conducteur.

3° *Limitation partielle des surintensités dangereuses.* — Sa conservation sera plus ou moins grande par rapport à celle du moteur série-directe suivant que α sera plus ou moins voisin de 1.

4° *Mise en parallèle sur le réseau de plusieurs dérivations contenant des moteurs.* — Elle dépend aussi de la grandeur de α comme

la propriété 3. Mais le réglage du flux aux changements de couplage peut être délicat à cause de la self-inductance de l'enroulement H.

5° *Commutation.* — Elle n'intervient guère, grâce aux pôles auxiliaires.

6° *Emballement du moteur aux faibles couples.* — Il est limité par l'excitation shunt et le réglage de la vitesse peut être obtenu, sans coupure des courants i, par variation de l'excitation séparée.

7° *Marche en génératrice. C'est la qualité fondamentale et importante de la dynamo compound.* — Supposons d'abord la marche motrice et les connexions faites de manière que les ampères-tours ni de l'enroulement k et les ampères-tours NI de H s'ajoutent arithmétiquement, c'est-à-dire soient de même sens. Augmentant l'excitation I supposée réglable, on augmente la force-électromotrice e de l'induit A. On peut ainsi réduire le courant i absorbé (flèche en trait plein) puis l'annuler, et enfin changer son sens (flèche pointillée) ou son signe.

On voit qu'alors les ampères-tours inducteurs résultants sont bien toujours la somme algébrique des ampères-tours de H et de K, mais ne sont plus en valeur absolue que la différence arithmétique de ces ampères-tours.

Il en résulte une limitation automatique de la surintensité $\triangle i$ du courant dans A, lors des variations lentes de U ou en régimes réguliers.

Explication du bon fonctionnement en régimes transitoires. — Lors des régimes *transitoires rapides*, on adopte généralement la même explication de l'accroissement du flux Φ avec le courant i invoqué pour le moteur série. Elle nous paraît insuffisante. En effet, outre le rôle amortisseur des courants de Foucault invoqué pour le moteur série-directe et s'opposant à la variation rapide du flux, l'enroulement séparé ou shunt H (fig. 4) semble former un excellent circuit amortisseur.

Le fait que l'enroulement H peut être en fil fin, ne change pas sensiblement la constante de temps du circuit électrique de H ou tout au moins son ordre de grandeur. En effet, à égalité de poids de cuivre de H ou plus exactement de son encombrement, la section de cuivre devenant $\frac{1}{n}$, L et R deviennent simultanément n^2 fois plus grands et le rapport $\frac{L}{R}$ est invariant approximativement. En réalité il augmente un peu à cause de la place prise par l'isolation

qui augmente avec le fil fin. Je crois qu'il faut encore invoquer le rôle fécond du flux de fuite des enroulements K et H, soit entre eux, soit avec A pour l'enroulement série. Je n'ai pas trouvé d'autre explication. La surintensité $\triangle i$ sera d'autant plus limitée que α sera plus grand.

Bien entendu, il faut encore ajouter comme effet utile, de même que dans le moteur série, les flux de fuite de A ou des pôles auxiliaires entre eux. Tous ces flux de fuite jouent le rôle d'une *bobine de self* mise en série avec A. La pratique montre que les *flux de fuite de H et K ont une part suffisante pour limiter les surintensités dangereuses en régime transitoire.* On ne peut s'empêcher de comparer le rôle de ces fuites à celui des fuites entre dents pour limiter les surintensités dans les bobines de stator de turbo-alternateurs (Boucherot).

L'inconvénient des flux de fuite, à beaucoup de points de vue, devient un atout pour procurer *une bobine de self gratuite.*

Il y aurait donc avantage à faire α très grand.

Critique. — Pour qu'il y ait fourniture d'énergie au réseau, il faut satisfaire à la relation (1) qui devient, en marche génératrice :

$$U = e - ri$$

tandis qu'en marche motrice

$$U = e + ri.$$

Mais, de plus, lors de la récupération, la chute ohmique en ligne diminue et même souvent s'inverse puisqu'on parle de tolérer qu'elle puisse devenir 1,3 U moyen. De plus, le circuit magnétique tend vers la saturation.

1° Il faut donc que les ampères-tours résultants deviennent beaucoup plus grands que ceux de la marche motrice.

2° Or ces ampères-tours résultants sont la différence arithmétique des ampères-tours de H et de K.

3° Excités par le réseau, les ampères-tours de H sont en fil fin d'où fragilité et encombrement.

4° La mise en parallèle de plusieurs dérivations sur le réseau contenant chacune une ou plusieurs dynamos mises en série est délicate, à moins que α ne soit grand, ce qui coûte cher, est lourd, encombrant et produit des pertes limitant la puissance des moteurs.

b) *Moteur compound indirect* (fig. 5). — Dans un même enroulement inducteur H, on peut produire :

1° Les ampères-tours NI seuls en disposant, à ses bornes, une tension e_b réglable ;

2° Les ampères-tours *ni* en disposant, à ses bornes, une tension e_a approximativement proportionnelle à I en grandeur et en signe.

3° Les ampères-tours NI ± *ni* en disposant, à ses bornes, une tension $e_b \pm e_a$.

Mais alors les ampères-tours résultant sont obtenus avec un poids

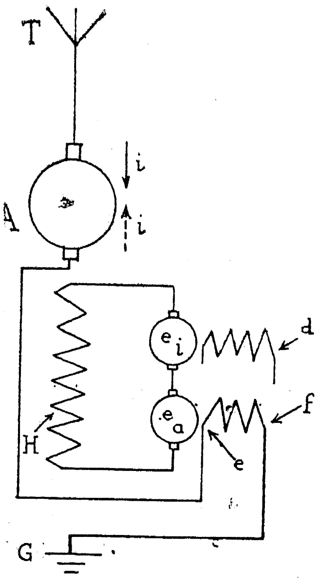


Fig. 5. — Moteur compound-indirecte.

de cuivre correspondant à la valeur absolue de la somme algébrique (NI + *ni*) et non à la somme arithmétique (NI) + (*ni*) mais, néanmoins, la valeur absolue (NI + *ni*) pour le fonctionnement en génératrice doit être beaucoup plus grand que sa valeur absolue en régime moteur.

C'est, en somme, ce qui est fait sous une forme plus ou moins directe sur les locomotives qui récupèrent, en Amérique et en France, aux chemins de fer du Midi, au P. L. M. et au Maroc, pour la récupération sur pente.

Notre rapport sur la récupération sur pente (1) mentionne plusieurs dispositifs pour obtenir la tension différentielle $e_b \pm e_a$. Mais, pratiquement, toutes nécessitent des résistances stabilisatrices.

L'excitation compound indirecte permet d'obtenir, en régime régu-

(1) *Bulletin de la Société Française des Electriciens*, octobre 1929.

lier, un rapport α élevé, ce qui facilite les marches en parallèle, en particulier.

Critique. — La méthode en régime régulier donne toute satisfaction mais, en régime transitoire rapide sans résistances stabilisatrices importantes, elle ne peut empêcher les surintensités inacceptables, sans conduire à des complications à rejeter dans l'application (bobi-

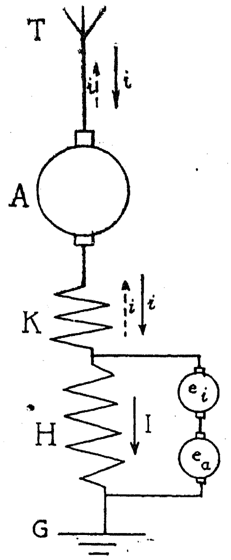


Fig. 6. — Moteur compound série-directe.

nes de self lourdes, régulateurs automatiques, etc.) ou à des dispositifs de tension différentielle volumineux.

La self-inductance de fuite de l'enroulement H ne joue que pour retarder l'établissement du flux Φ, elle s'ajoute à la self inductance du flux principal.

c) *Excitation compound semi-directe.* — Elle consiste à diviser l'enroulement inducteur d'une dynamo en 2 parties. L'une K, toujours en série directe avec l'induit, l'autre H, excitée par une tension différentielle $e_b + e_a$ (fig. 6).

Avantages. — Les fuites des enroulements K et H pourront jouer leur rôle bienfaisant pour limiter les surintensités comme dans l'excitation compound directe, mais l'enroulement K pourra être réduit, car on lui demande seulement d'intervenir au début d'un régime transitoire $U_{\text{moyen}} + \Delta U$.

L'enroulement H pourra avoir un rôle d'excitation à caractéristique compound indirecte très important, en régime régulier, c'est-à-dire correspondant à un grand rapport α, sans augmentation de poids de cuivre exagérée sur l'enroulement des inducteurs.

1° On pourra donc acquérir, à peu de frais, la propriété *poussée à l'extrême* d'une génératrice anti-compound en régime régulier et bénéficier, lors des à-coups, des propriétés de l'enroulement K (série-directe).

2° L'enroulement H pourra avoir la section que l'on désire soit une section de l'ordre de grandeur de celle de K.

3° On pourra d'ailleurs, en shuntant ou déshuntant K, exagérer son rôle dans les régimes transitoires rapides, par exemple les changements de couplage. On pourra aussi shunter ou déshunter l'enroulement d'excitation *ef* de l'excitatrice produisant la tension *e* par résistances ou bobines de self ou résistances inductives.

4° La dynamo peut être facilement transformée en moteur série directe en utilisant les enroulements K et H en série et inversement, sans ouverture des dérivations de moteurs sur le réseau.

Conclusion.

Jetons un coup d'œil sur le tableau suivant :

Moteur série-directe.	1° Indépendance du couple et de la tension du réseau, facilité d'obtenir de très grands couples. 2° Robustesse des enroulements inducteurs. 3° Propriété de limitation partielle des surintensités. 4° Mise en parallèle, sur le réseau, de plusieurs dérivations contenant des moteurs. Changements de couplages faciles. 5° Commutation facile aux collecteurs pour les grands couples. 6° Changement de couplage des moteurs.
Dynamos compound semi-directe.	7° Limitation de l'emballement aux faibles couples. 8° Marche en génératrice. 9° Freinage rhéostatique. 10° Freinage avec récupération. 11° Régime transitoire rapide. Rôle des fuites. 12° Facilité de marches en parallèle par suite de l'obtention économique d'un grand rapport α.

Les conditions 1, 2, 3, 4, 5, 6 sont incontestablement les qualités

remarquables du moteur série-directe (fig. 1) qui lui ont valu sa royauté en traction. Profitons-en.

Les conditions 7, 8, 9, 10, 11, 12 sont incontestablement réalisées par le moteur compound semi-direct (fig. 6).

Il est très facile de les obtenir toutes avec cet avantage remarquable que le freinage s'obtient facilement *avec couple approximativement constant* sans opérations supplémentaires, par l'excitation différentielle en compound semi-direct. Il suffit, pour le freinage avec récupération presque sans pertes rhéostatiques et presque jusqu'à l'arrêt, de transformer le moteur série en moteur compound semi-direct.

C'est le principe du dispositif *de régulation* que nous désirons vous exposer et particulièrement applicable aux chemins de fer métropolitains en n'invoquant que des faits contrôlés par la pratique. Il conduit à un freinage avec récupération presque jusqu'à l'arrêt, et au maintien automatique involontaire du couple constant ou peu variable pendant cette période.

A part le rôle invoqué des fuites des enroulements H et K, conduisant à la conception du moteur semi-direct, beaucoup d'entre vous trouveront sans doute cet exposé peu académique, bien long et inutile. Les discussions interminables qui sont soulevées prouve qu'il n'en est rien.

Nous avons fait de nombreux calculs personnellement mais nous avons constaté qu'ils manquaient souvent des vérités élémentaires qui doivent sauter aux yeux pour interpréter les faits fondamentaux de la pratique, c'est-à-dire de *l'expérience renouvelée chaque jour* que nous nous sommes efforcés d'expliquer par le simple bon sens physique.

Des questions de brevets rendent prématuré l'exposé des dispositifs de régulation que nous proposerons et qui allongeraient cette étude déjà très longue.

Très probablement, en novembre, pourrons-nous en donner les grandes lignes.

ETUDE DES CLAUSES TECHNIQUES EN VUE DE L'ÉTABLISSEMENT ÉVENTUEL D'UN CAHIER DES CHARGES POUR LES CONDENSATEURS DESTINÉS A L'AMÉLIORATION DU FACTEUR DE PUISSANCE DES RÉSEAUX (1)

par M. de la Gorce

On distingue :

I. — Les condensateurs à basse tension (jusqu'à 750 V).

II. — Les condensateurs à haute ou moyenne tension (qui actuellement ne sont guère utilisés au-dessus de 30 000 V.

I. — Pour les premiers — appareils peu coûteux et dont la détérioration n'a que des répercussions limitées, n'intéressant pas les réseaux — on propose les règles suivantes :

1° *Essais de surtension.* — *a*) entre bornes.

b) entre bornes et masse, en courant alternatif de fréquence F (2) sous une tension égale à 3 U (2) avec minimum de 500 V. Durée de chaque essai : 1 minute.

2° *Détermination de la capacité.* — La puissance apparente (volts-ampères) mesurée sous une tension sinusoïdale de valeur efficace U et de fréquence F, doit être au moins égale à celle indiquée par le constructeur. En cas de contestation, on mesurerait la capacité à l'aide d'un pont, en courant alternatif de fréquence F.

3° Les constructeurs indiqueront les pertes dissipées dans les condensateurs, sous la tension U et à la fréquence F. En cas de contesta-

---

(1) Rapport présenté

(2) Dans tout ce qui suit, on désigne par U et F la tension et la fréquence, auxquelles sont soumis, en service normal les condensateurs ou les éléments de condensateurs.

tion, ces pertes seraient mesurées par le Laboratoire Central d'Electricité ou sous son contrôle.

4° Les pertes mesurées, après 2 heures (1) de mise en service normal, ne devront pas excéder de plus de 30 pour cent (1) les pertes mesurées à l'instant initial.

La température d'essais sera comprise entre 10 et 35 degrés centésimaux.

On suggère en outre qu'un essai d'étanchéité pourrait être demandé à titre facultatif. Le condensateur serait immergé pendant 3 jours, puis soumis aux épreuves de surtension, spécifiées ci-dessus.

II. — Pour les condensateurs à haute ou moyenne tension (au-dessus de 750 V), on prévoit deux catégories d'essais :

A) des essais de réception ;

B) des essais de type.

A. — *Essais de réception*

Epreuves de surtensions : *a) avant montage* (en usine) sur chacun des éléments, essai en courant alternatif de fréquence F, sous une tension égale à 3 U, pendant 1 minute.

b) après montage : 1° entres bornes, essai sous tension continue égale à 6 U pendant 1 minute.

2° entre bornes et masse, essai sous tension alternative égale à 4 U, pendant 30 minutes (2) au plus.

Les règles relatives aux capacités et aux pertes diélectriques seront les mêmes que pour les condensateurs à basse tension.

B. — *Essais de type*

L'essai de type est destiné à garantir la bonne qualité d'une fabrication et en particulier à donner une sécurité aussi complète que possible sur la durée de fonctionnement des appareils. Il est effectué pour une fabrication déterminée et non pas pour chaque livraison.

Le condensateur soumis à l'essai de type aura une capacité suffisante (correspondant à 1 k VA environ). Il devra pouvoir supporter

(1) Chiffres provisoires donnés seulement à titre indicatif.
(2) On ne précise pas la durée de cet essai ; on indique seulement comme ordre de grandeur 10 à 30 minutes.

sans incident, en courant alternatif de fréquence F, une surtension égale à nU maintenue pendant x heures.

On propose d'adopter :

$$n = 4$$

$$\text{et } x = 5$$

Il est recommandé de suivre la variation des pertes diélectriques au cours de cet essai.

LES ACCIDENTS DUS A L'ÉLECTRICITÉ ET LES MOYENS DE SECOURS ACTUELS [1]

par R. LEGENDRE,

Directeur de Laboratoire à l'Ecole des Hautes Etudes,
Chef des Services techniques de l'Office national des Recherches et Inventions.

Statistique des accidents. — Mécanisme des accidents. — Prévention. — Secours d'urgence : méthode Schafer, appareils Panis, inhalations d'oxygène, appareils Legendre et Nieloux.

Les accidents dus à l'électricité, qui se bornèrent longtemps à ceux très rarement occasionnés par la foudre, se sont considérablement multipliés avec le développement industriel et augmenteront encore à mesure que s'étendront les emplois de l'électricité et les réseaux de distribution.

Il est donc devenu indispensable de les connaître dans leurs causes et leurs formes diverses pour les prévenir et, s'ils se produisent, pour les traiter.

Ils constituent aujourd'hui tout un chapitre de l'hygiène industrielle et sociale et comptent parmi les rubriques des accidents du travail.

Il y a lieu d'ailleurs de les rapprocher, ne serait-ce qu'au point de vue des premiers secours à leur apporter, d'autres accidents de mécanismes physiologiques tout différents, mais provoquant aussi l'asphyxie : les ensevelissements, les noyades, les intoxications par les gaz nocifs et notamment celles par l'oxyde de carbone.

D'ailleurs, si la distribution et l'utilisation de l'énergie électrique créent surtout des risques d'électrocution, sa production dans les centrales hydrauliques et thermiques est cause de noyades et d'intoxications par l'oxyde de carbone.

Nous examinerons ensemble tous ces accidents puisqu'ils imposent les mêmes règles de sauvetage.

Statistique des accidents. — J'ai essayé, il y a quelques années (2),

---

(1) Conférence faite à l'Ecole supérieure des Postes et Télégraphes le 15 mai 1931. Le rapport sera discuté à la Semaine de discussion de novembre 1931.
(2) *Revue d'hygiène*, t. XLVIII, mai 1926.

d'établir une statistique des asphyxies de tous ordres, pour estimer le nombre des hommes qu'on pourrait sauver par une éducation du public et une organisation des secours. C'est une enquête très difficile à faire, mais le peu de données précises qu'elle apporte, montre l'importance de la question. On sait — c'est le dénombrement qu'on connaît le mieux et qu'on cache le moins — qu'il y a tous les ans en France 8000 morts violentes par suicides : pendus, noyés, asphyxiés au gaz et au charbon. Ce nombre figure dans la Statistique générale de la France. Les éboulements dans les carrières, les mines, les sablières ne sont pas rares, mais je n'ai pu établir le nombre d'ensevelissements qu'ils causent.

Pour les noyés par accidents, les données sont peu précises. En Grande-Bretagne, une statistique déjà vieille en réunit 3000 cas par an. A Paris, les postes de secours établis sur les berges soignaient un noyé par jour : 365 par an. Il y a quelque temps, M. de Lalyman a pu avoir connaissance, notamment en dépouillant les journaux, de 1364 morts par noyade en une année; il a compté une moyenne de 20 morts par jour pendant les mois d'été ; presque tous sont des jeunes gens.

Les intoxications par l'oxyde de carbone doivent être très nombreuses, mais il est impossible d'en avoir un recensement quelconque. On ne parle guère que des catastrophes atteignant un grand nombre d'hommes : explosions ou incendies dans des mines, intoxications collectives dans des hauts-fourneaux, des fonderies, des usines à gaz, ou des accidents domestiques retentissants comme la mort de Zola. Mais les multiples cas de tous les jours, causés par des fuites de gaz dans les maisons, des défauts de gazogènes, des ratés de moteurs à explosion, etc. restent ignorés ou méconnus.

Le nombre des morts dues à l'électricité n'est guère mieux établi. Les accidents domestiques échappent à toute surveillance. Les électrocutions industrielles sont déclarées à deux ministères différents, selon qu'elles se produisent dans les centrales et sur les réseaux publics ou dans les établissements d'utilisation. Le Service de l'Inspection du travail relève environ 1200 cas par an : le ministère des Travaux publics n'en compte qu'une centaine, presque tous mortels.

Lorsqu'on fait le total de ces accidents, et si l'on considère que les statistiques sont loin de représenter tous les cas qu'on peut découvrir, on aboutit à ce sentiment qu'il doit mourir chaque année, en France, une vingtaine de mille hommes par ces divers genres d'asphyxies que nous venons d'indiquer : éboulements, submersions, électrocutions,

intoxications par les gaz toxiques (oxyde de carbone, acide carbonique, etc.).

C'est une perte d'une soixantaine de vies humaines par jour, dont beaucoup pourraient et devraient être sauvées par des secours immédiats.

Mécanisme des accidents. — Les morts dues à l'ensevelissement, la submersion, l'intoxication par l'oxyde de carbone, les électrocutions, ont des mécanismes différents, mais aboutissant tous à un état commun : l'asphyxie.

Quand un éboulement se produit, les hommes ensevelis périssent par compression, par impossibilité mécanique de continuer les mouvements respiratoires, par non renouvellement de l'air pulmonaire.

Les submergés se trouvent isolés de l'atmosphère et emplissent d'eau leurs poumons quand ils ne peuvent plus maintenir arrêtée leur respiration.

L'intoxication aiguë par l'oxyde de carbone a un mécanisme plus complexe qu'on connaît parfaitement aujourd'hui grâce aux beaux travaux de Nicloux. L'hémoglobine des globules rouges du sang a plus d'affinité pour l'oxyde de carbone que pour l'oxygène; à tensions partielles égales, elle fixe 200 fois plus d'oxyde de carbone que d'oxygène. Dans une atmosphère à 1 °/₀₀ d'oxyde de carbone, la moitié du sang devient oxycarbonée. Or, les malaises apparaissent dès que 20 à 30 o/o du sang sont atteints et la mort quand les 2/3 de l'hémoglobine ont fixé l'oxyde de carbone. L'homme est donc sensible même à de très faibles concentrations d'oxyde de carbone et la moindre fuite des appareils domestiques à gaz d'éclairage des gazogènes, des hauts fourneaux, la combustion lente dans les appareils de chauffage, la mauvaise carburation des moteurs à explosion sont causes d'accidents. Si l'intoxication lente a des effets très complexes, l'intoxication aiguë se manifeste uniquement comme une asphyxie par anémie.

Les accidents électriques sont beaucoup plus polymorphes et l'on a de la peine à les classer, d'autant plus qu'on ne sait pas les reproduire exactement et avec constance, sur les animaux de laboratoire.

Dès 1887, d'Arsonval avait distingué les effets directs de la décharge, désorganisant les tissus, contre lesquels il n'est pas de remède, et les effets indirects, par action réflexe sur les centres nerveux, provoquant l'inhibition, la syncope, la mort apparente, dont on vient à bout par par la respiration artificielle, d'où la règle formulée par d'Arsonval : un électrocuté doit être traité comme un noyé.

Depuis, Jellinek, de Vienne, a recueilli un très grand nombre d'observations d'accidents électriques, dans les conditions les plus diverses, et il en a publié de riches iconographies.

On a souvent tendance, et surtout peut-être dans les milieux d'électriciens professionnels, à considérer que le courant électrique n'est dangereux qu'aux tensions élevées. On se méfie des lignes à haute tension, mais on touche sans crainte et sans précautions les fils d'éclairage et les installations domestiques à 110 volts. On oublie trop que ce n'est pas la tension qui tue, mais bien l'intensité du courant dérivé à travers le corps.

Mais ce qui compte autant que la tension, c'est la résistance du corps, ou plus exactement celle de la peau en contact avec les fils et le sol. Avec des mains sèches, ou gantées de caoutchouc, ou tenant un isolateur sec, on peut toucher sans danger des conducteurs à assez haute tension; la sécurité est accrue quand les pieds sont également secs, dans des chaussures sans clous traversant la semelle, ou mieux portant sur un tabouret isolant.

On ne meurt généralement pas d'un contact avec une ligne ordinaire d'éclairage, mais 110 volts suffisent largement à tuer quand les mains sont mouillées, les pieds nus ou dans des sandales perméables sur un sol humide ou métallique.

C'est dire qu'on ne peut établir de règles précises sur les dangers des diverses sortes de courants et que les textes administratifs distinguant des courants de plusieurs catégories selon les tensions ne prétendent pas fixer des limites précises.

Bien plus, on sait qu'un courant passant entre deux points d'un même membre ou même les deux membres du côté droit, produit généralement des effets moins désastreux que le même traversant le corps d'un bras à l'autre.

On a essayé de distinguer les effets du courant continu de ceux de l'alternatif. Il semble que le premier agisse différemment et provoque l'électrolyse des tissus, même quand on n'aperçoit aucun effet extérieur.

Nous ne dirons rien ici des courants alternatifs à très hautes fréquences : courants de d'Arsonval, ondes courtes de T.S.F. dont on cherche de plus en plus à utiliser en thérapeutique les effets physiologiques, notamment ceux de capacité.

Nous insisterons surtout sur les courants alternatifs industriels, à une cinquantaine de périodes par seconde, causes des accidents les plus fréquents.

Ceux-ci ont souvent des effets inattendus, imprévisibles. Je ne parle pas seulement des cas extraordinaires, tels que la volatilisation d'un conducteur à haute tension au contact de la peau, provoquant une véritable métallisation étendue et continue du tégument. Jellinek a publié une photographie impressionnante d'un dépôt de cuivre couvrant toute la face, effroyable à voir et ayant cependant guéri.

Rarement, les hautes tensions provoquent la syncope sans occasionner de brûlures et de marques, plus ou moins durables.

Parfois, il se forme à partir du point de contact une arborescence sur la peau. Jellinek a montré des gens ayant ainsi une véritable fulgurite sur le visage ; ils avaient touché un câble à haute tension et à partir du point de contact il s'était produit des ramifications, comme sur certains arbres atteints par la foudre.

Plus souvent encore, dans le cas des hautes et moyennes tensions, le contact avec les conducteurs provoque une brûlure très particulière. Assez peu étendue sur le moment, elle évolue les jours suivants en une nécrose de plus en plus profonde, mettant les chairs à vif et continuant souvent jusqu'à l'os. Heureusement, ce genre de plaies tend à rester aseptique, mais parfois, quand il y a eu chute sur le sol au moment de la rupture du courant, la plaie s'infecte, se gangrène et oblige à l'amputation.

Ce genre de brûlures, en calcinant la peau, augmente fortement sa résistance et diminue la dérivation passant par le corps ; assez souvent, ces lésions, même étendues ne sont pas suivies de syncope.

Le contact avec une ligne provoque la contracture énergique des muscles atteints par la décharge ; il en résulte un accrochage sur les fils, tel qu'on ne peut parfois détacher la victime avant d'avoir coupé le courant.

Les basses tensions sont, bien à tort, trop souvent considérées comme inoffensives ; le nombre des accidents qu'elles causent en est augmenté d'autant. Certes, on peut recevoir sans risque une décharge sous 110 V — à qui cela n'est-il point arrivé ? — Mais il faut savoir que cela n'est vrai que si l'on est isolé du sol et si l'on a la peau sèche. Quelqu'un qui a aux pieds des semelles de caoutchouc ou de cuir cousu et qui entre en contact d'une seul main avec un fil sous 110 V ne ressent tout au plus qu'une secousse désagréable ; le même contact avec des souliers cloutés dont les pointes traversent la semelle, ou des sandales mouillées, ou les pieds nus ou moites sur un sol humide risque d'amener la mort, sans brûlures, par syncope. Trop souvent des ouvriers font par négligence des terres parfaites : le chau-

dronnier tenant à la main une lampe baladeuse à fil souple qui entre dans une chaudière pour la réparer; le couvreur sur un toit, après la pluie, maniant ses outils ou son échelle près d'une ligne de distribution ; le monteur qui répare un moteur sans avoir coupé le courant, dans une fosse, une cave, une grange au sol de terre battue, etc. Les accidents domestiques sont de plus en plus nombreux, à la cave, à la cuisine, dans le bain, le cabinet de toilette, chaque fois que le corps mouillé ou humide fait court-circuit entre une ligne mal isolée et la terre. Le Dr ZIMMERN, par exemple, a signalé à maintes reprises des morts survenues dans ces conditions.

On pourrait dire, sans préciser trop, qu'à partir d'une vingtaine de volts, les accidents deviennent possibles. Ils seraient certes de plus en plus fréquents et dangereux à mesure que la tension augmente, si l'on portait une égale attention à tous les genres de courants. Mais comme on n'hésite guère à toucher 110 V avec les doigts — (et il est des ouvriers qui se risquent avec insouciance sur 220 et même 500 V), — tandis que personne n'approche une ligne à 1500 ou 60.000 V sans de grandes précautions, la fréquence des électrocutions n'est pas fonction de la tension des réseaux, mais bien plutôt de l'ignorance et de l'imprudence des usagers. Quand on a compris qu'il y a danger, les accidents deviennent plus rares; lorsqu'on ne le sait pas ou qu'on n'y porte pas attention, ils sont bien plus nombreux et c'est ainsi qu'actuellement, on constate ce paradoxe que le plus grand nombre des accidents électriques se produit sur les lignes à basse tension.

Les exemples d'électrocution sont très variés, et l'on ne peut songer à les passer tous en revue. Le Dr JELLINEK en a rassemblé un très grand nombre en une série de magnifiques dessins. Les affiches de prévention en montrent également quelques types. Pour en donner une idée, je citerai seulement certains cas, choisis parmi les plus fréquents, uniquement afin d'attirer l'attention sur les précautions élémentaires à prendre.

A mesure que se poursuit l'électrification du territoire, les lignes de distribution électrique se multiplient le long des routes, dans les champs. Certes, on élague les arbres au voisinage, mais ils repoussent et nombre d'enfants qui y grimpent pour dénicher les nids ou dégager leur cerf-volant pris dans les fils créent des courts-circuits dont ils sont les premières victimes.

Les lignes fixées aux murs des maisons, dans les traversées de lieux habités, sont parfois atteintes par des ouvriers travaillant sur les toits ou des paysans maniant de longs outils : fourches, perches, ou

debout sur des voitures haut chargées de foin ou de paille. Les pompiers ont déjà appris à se méfier de ces fils et évitent maintenant de les atteindre avec le jet d'eau de leur lance quand ils combattent un incendie.

Dans les agglomérations, les lignes souterraines sont quelquefois découvertes par un terrassier imprudent qui plante sa pioche directement dans un câble dont il ignorait la présence, ou encore un courant vagabond dû à un défaut d'isolement a chargé fortuitement d'autres conduites d'eau ou de gaz qu'il va réparer.

On ne compte plus les poteaux, supportant des lignes, renversés par des automobiles ou des chevaux attelés. C'est souvent la cause d'un chapelet d'accidents : les premières victimes restent en contact avec les fils et les sauveteurs qui viennent à leur secours tombent électrocutés dès qu'ils les touchent, jusqu'au moment où l'un d'eux, plus réfléchi ou mieux prévenu, écarte les fils ou prévient la centrale de couper le courant. Et je ne parle pas des troubles et même des accidents à distance causés par l'enchevêtrement des fils à haute et à basse tension et des fils téléphoniques, quand plusieurs lignes courent parallèlement sur les mêmes poteaux.

Les accidents sont également très nombreux dans les fermes où les paysans, en sabots plus ou moins mouillés, sur un sol humide, veulent changer une lampe ou mettre en route un moteur dans une installation mal faite, insuffisamment isolée ou détériorée.

A la ville, les gens dans leur bain qui veulent allumer une lampe ; les femmes à leur toilètte qui prennent un fer à friser électrique ; les cuisinières qui manient le fer à repasser ou une lampe, et mettent l'autre main sur le robinet d'eau ; les ouvriers qui, au cours d'une réparation, court-circuitent les fils de distribution à travers leur corps avec les canalisations d'eau, de gaz, de chauffage central, sont légion.

On ne saurait trop préciser les règles d'installation domestique, surveiller leur exécution, apprendre au public qu'on ne doit pas plus tolérer une fuite d'électricité qu'une fuite de gaz, et que tout appareil donnant une décharge quand on le touche est dangereux et peut devenir mortel.

On pourrait encore signaler les phénomènes d'induction, de résonance et de capacité entre lignes disposées parallèlement, parfois si gênants sur les lignes téléphoniques. Je ne m'y arrêterai pas, le remède n'étant pas à la portée du public, et je préfère me borner aux questions de prévention et de secours qu'il est indispensable de faire connaître à tous et qu'on doit répéter inlassablement.

La prévention des accidents. — La diminution du nombre des électrocutions dépend avant tout de la construction, de l'installation et du bon entretien des centrales, des réseaux de distribution et des appareils d'utilisation. Le Ministre des Travaux Publics a prescrit des règles détaillées, les syndicats d'électricité ont prévu des cahiers des charges et organisé des contrôles qui doivent, strictement appliqués, réduire au minimum les possibilités d'accidents. Mais il reste encore beaucoup à faire pour éduquer les usagers. Déjà, un peu partout, les associations de prévention ont édité des affiches, souvent très frappantes, qui mettent en garde les ouvriers contre les dangers de l'électricité ; il faut souhaiter leur diffusion dans tous les établissements industriels. Il reste à atteindre pareillement les milieux ruraux d'une part, et, d'autre part, tout le public en insistant sur les accidents domestiques.

Quelles que soient les précautions de sécurité prises dans les installations et la diffusion des notions élémentaires de prévention, il restera toujours un certain nombre d'accidents inévitables et imprévisibles. Il faut donc savoir également ce que chacun doit faire en cas d'accident, pour porter secours sans danger et d'une façon efficace. C'est à cette propagande que je consacre mes efforts depuis nombre d'années.

Les secours d'urgence. — Il peut arriver à n'importe qui, un jour ou l'autre, de se trouver en présence d'un asphyxié, que ce soit un électrocuté, un noyé, un intoxiqué par l'oxyde de carbone, un pendu, un enseveli. L'asphyxié est en danger de mort imminente. La rapidité des soins — et il s'agit toujours d'une question de minutes — décide seule de son sauvetage. C'est dire qu'il ne suffit pas d'appeler un médecin, une voiture d'ambulance, des secours lointains et d'attendre qu'ils arrivent. Ils arriveront toujours trop tard. La vie d'un asphyxié dépend de la première personne qui l'aperçoit. C'est pourquoi il faut que tout le monde sache ce qu'on doit faire en pareil cas.

Certes, il est nécessaire d'appeler un médecin : les secours d'urgence peuvent être insuffisants pour remédier à toutes les conséquences de l'accident ; certes, il est utile de prévoir le transport ultérieur du malade, mais, dans aucun cas, on ne doit attendre sans rien faire et jamais on ne doit mettre en voiture un homme en état de syncope, il sera mort à l'arrivée.

J'insiste sur ces notions d'élémentaire bon sens ; elles sont encore trop souvent ignorées.

Il ne faut pas non plus, en voulant porter secours, risquer de faire une victime de plus.

On ne doit aller chercher un intoxiqué par l'oxyde de carbone tombé dans un endroit où les gaz peuvent séjourner ou s'accumuler ; caniveau, tranchée, cave, etc., qu'après s'être fait corder.

On ne doit toucher un électrocuté qu'après s'être assuré qu'il n'a pas de contact avec les conducteurs sous tension ou avoir écarté ceux-ci. Les précautions à prendre doivent être d'autant plus grandes que la tension est plus élevée. Souvent, on sait quelle est la tension du courant qui a causé l'accident ; l'aspect de la ligne l'indique approximativement. S'il s'agit de courant à basse tension — 110 ou 220 V, — on peut approcher l'électrocuté sans grandes précautions ; si c'est un courant de 500 ou 600 V, il faut être plus prudent ; et si la ligne est à très haute tension, il ne faut jamais toucher à l'accidenté.

Avant d'écarter les fils à basse tension, il suffit de ne pas mettre ses pieds dans une flaque d'eau. Si l'on a une canne, il est préférable de s'en servir pour écarter le fil plutôt que le toucher avec les doigts. Sauf si l'on est trempé soi-même, on ne risque guère plus qu'une secousse désagréable, surtout si l'on a soin de n'opérer qu'avec une main, la droite.

Si le courant est plus élevé, il faut d'abord s'isoler d'un contact possible. On le peut de diverses façons : un journal ou un papier sec étendu en plusieurs épaisseurs sur la terre humide suffit pour quelques instants ; sur un terrain mouillé, des planches sèches trouvées au voisinage, mises en pile ou posées sur quatre bouteilles couchées peuvent faire un tabouret isolant ; on peut trouver un manche à balai, une perche, une tige de bois quelconque, suffisamment sec pour s'isoler des fils qu'on veut déplacer. Toujours, on doit agir d'une seule main, la droite.

Sur les lignes à très haute tension, tout ce qui vient d'être indiqué est insuffisant : il n'y a d'autre solution que de prévenir la centrale ou la sous-station de couper le courant et de n'approcher l'électrocuté que lorsqu'on est certain que la ligne n'est plus en charge.

Une fois que la victime a été isolée des fils, on peut la toucher sans danger. Si elle n'a pas été brûlée, elle se présente comme tous les asphyxiés ; inerte, la respiration suspendue, le cœur battant faiblement. C'est alors qu'il importe de ne plus perdre un seul instant. Immédiatement, on commencera les manœuvres de respiration artificielle.

On a successivement proposé diverses méthodes pour rétablir la

respiration. Je n'en ferai pas l'historique et même me limiterai à la dernière et la plus efficace si l'on ne trouvait encore trop souvent, dans les livres et dans l'enseignement l'indication d'autres moyens périmés.

En effet, la circulaire de 1903 du Ministère des Travaux Publics prescrivait pour les premiers secours les méthodes de Laborde et de Sylvester.

En Angleterre, apparut en 1907, une nouvelle méthode proposée par une commission chargée d'étudier les meilleurs moyens de secours aux noyés, que présidait le professeur SCHAFER d'Edimbourg ; elle se répandit sous le nom de « prone-pressure method » (pression du malade couché sur le ventre), aux Etats-Unis, en Allemagne, etc., mais ne pénétra guère en France.

Pendant la guerre, j'eus l'occasion de la faire adopter par le Service de Santé. Puis, le professeur NICLOUX et moi précisâmes les meilleurs moyens de secours aux asphyxiés (respiration artificielle par la méthode SCHAFER et inhalations d'oxygène) qui furent soumis au Conseil supérieur d'hygiène publique de France et approuvés par lui le 23 avril 1923.

Leur application dans les usines d'électricité posait un délicat point de droit qui fut soulevé par une société de la région parisienne : leur désaccord avec les instructions officielles du ministère des Travaux publics. Celles-ci furent alors révisées par une commission présidée par M. d'ARSONVAL et dont je fis partie. Ses travaux aboutirent au décret du 23 janvier 1927, dont le texte est reproduit dans l'arrêté du ministre du Travail du 6 juin 1929.

Aujourd'hui, une affiche officielle rédigée en exécution du décret de 1927, est obligatoirement apposée partout, dans les usines, les ateliers, sur les postes de transformation, etc. ; elle indique au public les secours d'urgence à pratiquer en cas d'accident.

Malgré cela, on trouve encore parfois préconisées les méthodes officielles antérieures. J'en dirai seulement quelques mots pour faire comprendre leur infériorité.

L'une d'elles, la méthode de LABORDE, consiste à coucher l'asphyxié, quel qu'il soit, sur le dos, à lui ouvrir la bouche, puis à tirer sa langue rythmiquement. Quand on veut l'appliquer, on s'aperçoit qu'il est très difficile d'ouvrir la bouche, quand — ce qui est le cas le plus fréquent — les mâchoires sont serrées et contractées. Il est encore plus difficile de maintenir la langue hors de la bouche; elle glisse entre les doigts, à tel point que dans les salles d'opérations où les syncopes

en cours d'anesthésie sont prévues, on dispose de tout un arsenal d'instruments : ouvre-bouches et tire-langues, spécialement inventés à cet effet. De plus, les tractions rythmées de la langue sont d'un effet incertain.

La méthode de SYLVESTER consiste, une fois qu'on a ouvert la bouche et tiré la langue hors de la bouche du patient couché sur le dos, car il faut commencer par là, à pratiquer les mouvements respiratoires en mouvant les bras : on les tire en arrière afin que la poitrine bombe et que l'air y entre, puis on les laisse retomber sur la poitrine à plat pour provoquer l'expiration. Outre que la préhension de la langue présente les mêmes difficultés que dans la méthode de LABORDE, les mouvements des bras sont très fatigants et ne peuvent être continués longtemps, alors qu'il est nécessaire, dans certains cas, de poursuivre les manœuvres de respiration artificielle pendant une heure et plus. Toutefois, si la méthode de SYLVESTER est exténuante, elle est plus efficace que celle de LABORDE.

Ce sont là méthodes périmées qu'il ne faut plus essayer d'appliquer, même si on les trouve encore préconisées. Il ne faut jamais coucher l'homme sur le dos; il ne faut pas lui remuer les bras; il n'y a pas à perdre de temps pour ouvrir la bouche et saisir la langue. La méthode de SCHAFER a supprimé tout cela.

Le gros avantage de la méthode de SCHAFER est qu'elle économise le temps et les forces du sauveteur. On ne met plus l'asphyxié sur le dos, mais sur le ventre, à plat ventre. Par conséquent, s'il s'agit d'un noyé qui a introduit de l'eau dans ses poumons cette eau coulera facilement; s'il existe des mucosités dans la trachée, elles s'évacueront aisément; la langue, flasque, tombante, qui bouchait les orifices respiratoires de l'asphyxié couché sur le dos, pend dans la bouche du même couché sur le ventre et n'empêche plus l'entrée et la sortie de l'air. On peut donc commencer les mouvements respiratoires immédiatement, sans aucune perte de temps.

Pour pratiquer la respiration artificielle, on se met à cheval sur les cuisses de l'asphyxié, les deux mains étendues de chaque côté de la colonne vertébrale, au niveau des dernières côtes. Il suffit alors d'appuyer sur les mains, progressivement, de tout son poids, pour aplatir en quelque sorte le thorax et provoquer l'expiration, puis de se relever lentement en cessant la pression pour que l'asphyxié se regonfle et inspire largement : on recommence ces mouvements lentement, régulièrement, en les réglant sur sa propre respiration. Cela demande beaucoup moins de place que la méthode de SYLVESTER et n'exige aucun

préparatif; de plus, c'est beaucoup moins fatigant et, par suite, on peut continuer plus longtemps, condition souvent indispensable pour la ressuscitation.

La méthode de SCHAFER a maintenant fait largement ses preuves et elle est de toutes la plus simple, la plus rapide, la plus efficace, la plus pratique.

Elle doit désormais être connue de tous et partout enseignée et démontrée.

Dans les industries où l'on doit prévoir des accidents plus ou moins fréquents, survenant au même point, on peut faire mieux encore.

Sur mes conseils, le Dr PANIS a réalisé un appareil mécanique de respiration artificielle appliquant la méthode de SCHAFER d'une façon encore moins fatigante et plus énergique. Le malade est couché à plat ventre sur un plan incliné résistant, le front reposant sur un bandeau de cuir, les épaules butant sur des épaules mobiles et le dos entouré par une ceinture. La ceinture sanglée, le sauveteur n'a plus qu'à abaisser un long levier pour que les épaulières s'effacent et que la sangle comprime le corps sur le plan inférieur rigide, provoquant l'expiration. Quand le levier est abandonné, il remonte par l'action de ressorts; la sangle se relâche, les épaulières appuient les épaules en arrière, le thorax reprend par élasticité son volume, provoquant l'inspiration. La manœuvre de l'appareil PANIS demande si peu d'efforts qu'elle peut être continuée très longtemps par le même sauveteur, même assis sur une chaise.

L'appareil PANIS a connu un tel succès dans l'industrie qu'on a vu naître d'autres modèles, qui s'en sont plus ou moins inspirés. Le premier appareil du Dr CHÉRON diffère de celui de PANIS en ce qu'il comprime le ventre et non le dos, au moyen d'une plaque inférieure, soutenant l'abdomen que le levier relève au moment de l'expiration. Le médecin-colonel COT, du Régiment des Sapeurs-Pompiers de Paris, a inventé un autre dispositif qui permet de modifier l'inclinaison du corps. Enfin, tout récemment, le Dr CHÉRON a présenté un nouvel appareil plus énergique qui fait pression double, par le ventre et par le dos.

Un homme en état de syncope, ne respirant plus, est un asphyxié dont le sang manque d'oxygène. Les manœuvres de respiration artificielle ont justement pour but, entre autres, de rétablir le contact entre l'air et le sang au niveau des poumons. La ressuscitation sera plus rapide si l'on introduit dans les poumons de l'oxygène pur au lieu d'air. L'action est particulièrement efficace, elle est spécifique dans le

cas d'intoxication par l'oxyde de carbone, puisque l'élimination de ce gaz croît avec la tension d'oxygène. Elle est utile dans tous les autres cas.

Nous avons mis au point, le professeur NICLOUX et moi, un masque et un appareil pour assurer l'inhalation d'oxygène pendant les manœuvres respiratoires selon la méthode SCHAFER.

Le masque, métallique, bordé d'un bourrelet de caoutchouc, peut être posé par terre et il suffit alors de placer sur le bourrelet la face de l'asphyxié couché sur le ventre pour obtenir une fermeture étanche. Ou bien encore on peut fixer le masque sur la face au moyen d'une bride entourant la tête, tandis que le front est tenu par le bandeau d'un appareil respiratoire. Sur les côtés, le masque présente deux soupapes légères, l'une pour l'expiration, l'autre pour l'inspiration. Du côté de l'inspiration, on fixe un caoutchouc de gros diamètre relié à un sac souple dans lequel arrive de l'oxygène.

Dans les centres industriels où l'on dispose constamment de bouteilles d'oxygène comprimé, notamment pour la soudure autogène, il suffit de brancher le tuyau de sortie du gaz au conduit du sac pour envoyer dans le masque, devant les orifices respiratoires de l'asphyxié, de l'oxygène pur que les manœuvres respiratoires font pénétrer dans les poumons.

Si l'on n'a pas de cylindres d'oxygène comprimé, on peut y suppléer en employant un nécessaire transportable dans lequel se trouve une bouteille de 500 litres, suffisante pour le sauvetage d'un homme ou deux.

En résumé, les secours d'urgence aux asphyxiés de tous genres et notamment aux électrocutés se ramènent à ceci. Prendre toutes les précautions pour séparer le corps des fils sous tension avec lesquels il peut être en contact ; appeler le médecin, mais ne pas l'attendre sans rien faire ; ne pas transporter l'accidenté vers un lointain hôpital. Les soins, pour être efficaces, doivent être donnés sur place, immédiatement. Ils consistent avant tout en manœuvres de respiration artificielle, pratiquées selon la méthode SCHAFER, à la main, ou mieux si l'on peut, avec un appareil mécanique. Si l'on dispose d'oxygène sous une forme quelconque, on en fait respirer, au mieux sous un masque approprié, sinon en faisant arriver le tuyau d'oxygène sous des compresses fixées devant la bouche et le nez.

Quand ces quelques notions seront connues de tous, qu'elles seront enseignées, démontrées, répétées partout ; quand tous les endroits dangereux où l'on doit prévoir la possibilité d'accidents : mines, usines

à gaz, cokeries, centrales électriques, etc., seront munis de postes de secours comportant essentiellement un appareil respiratoire et un nécessaire à inhalations d'oxygène et que leur personnel aura été entraîné à s'en servir, on réduira dans une très grande proportion les morts par asphyxies. En voici quelques exemples.

A l'usine à gaz de Gennevilliers, on a installé il y a quelques années trois postes de secours complets et instruit le personnel ; depuis lors, 25 accidents se sont produits : électrocutés, intoxiqués par oxyde de carbone, noyés ; 24 personnes ont été sauvées.

A Paris, les sapeurs-pompiers ont été chargés d'organiser un service de premiers secours qui répond à tout appel en envoyant sur place un appareil respiratoire et un nécessaire à inhalations d'oxygène ainsi qu'un infirmier au courant des soins d'urgence. Il y a un an, le médecin-colonel du régiment, M. Cot, a publié la première statistique de ce nouveau service. Il a déjà répondu à 150 appels et a réussi à ressusciter 85 personnes ; si la proportion est moins belle qu'à Gennevilliers, c'est que les demandes sont souvent beaucoup trop tardives, mais on peut espérer mieux quand ce moyen de secours sera plus connu.

Dire que le problème est entièrement résolu et qu'il n'y a plus de progrès à accomplir serait faux.

Notamment, en ce qui concerne les électrocutés, il est frappant de remarquer le temps souvent très prolongé pendant lequel on doit pratiquer la respiration artificielle. Il n'est pas rare, en effet, de voir persister deux heures et même beaucoup plus l'état syncopal, et c'est pourquoi, dans les instructions du Ministère des Travaux Publics, il est dit qu'il ne faut jamais abandonner un électrocuté sans avoir des signes certains de sa mort. Ces signes, le médecin seul en est juge, et l'on doit toujours continuer les secours d'urgence jusqu'à son arrivée. Il peut estimer utile d'essayer d'autres moyens : la saignée ou l'injection intracardiaque d'adrénaline, par exemple. Mais il reste encore à trouver le moyen d'activer le retour à la vie de tous les asphyxiés et particulièrement des électrocutés.

Pour le moment, les seules notions efficaces sont celles que j'ai indiquées ici : la respiration artificielle par la méthode Schafer et, si possible, l'inhalation d'oxygène.

L'Office national des Recherches et Inventions a établi un film de propagande et d'instruction qui a déjà passé dans de nombreux établissements pour l'éducation de leur personnel.

MÉTHODES DE MESURE DES PERTES DANS LES DIÉLECTRIQUES (1)

par M. Vassillière-Arlhac

Définitions. — Méthodes de mesures directes : wattmètre électrostatique ; wattmètre électrodynamique ; wattmètre compensé ; méthode calorimétrique, — indirectes : wattmètre indicateur de quadrature ; pont de Sauty ; pont de Schering ; pont de Janvier ; conclusions. — Appendices : facteur de puissance dans le cas d'une tension non sinusoïdale ; pont de Schering, équations de mesures ; pont de Janvier, équations de mesures.

Au cours de ces dernières années, l'évolution considérable de l'industrie électrique en haute tension a mis en relief le rôle important joué par les diélectriques utilisés pour l'isolement.

La connaissance de leurs propriétés et plus particulièrement de la perte d'énergie dans les isolants soumis à des différences de potentiel

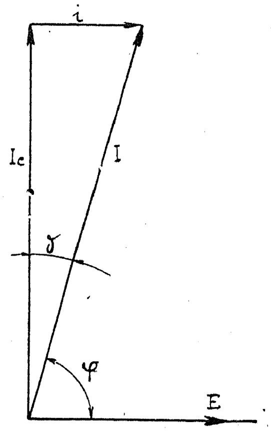


Fig. 1. — Diagramme de l'angle de perte.

alternatives, a fait l'objet d'un grand nombre de travaux particulièrement intéressants, justifiés par l'intérêt que présente la détermination aussi précise que possible de cette perte.

En effet, la perte diélectrique, constatée en 1864 par Siemens, a

(1) Cette communication présentée à la 6e Section du Comité de la Société française des Electriciens le 16 juin 1931 sera discutée à la Semaine de novembre 1931.

pour effet d'échauffer la masse même de l'isolant, augmentant donc sa conductibilité et tendant à provoquer une rupture.

Toutes les difficultés présentées par la définition et par les mesures des pertes diélectriques, proviennent de ce que ces diélectriques ne sont jamais des corps purs. Ce sont toujours en pratique des associations de matières dans lesquelles chaque constituant intervient avec ses caractéristiques propres. On est donc presque toujours en présence d'un phénomène complexe ; les mesures ne sont alors applicables qu'aux échantillons essayés et on ne peut guère espérer en tirer des valeurs spécifiques.

Définitions. — L'on sait qu'un condensateur dont l'isolement serait parfait, soumis à une différence de potentiel alternative, ne donnerait

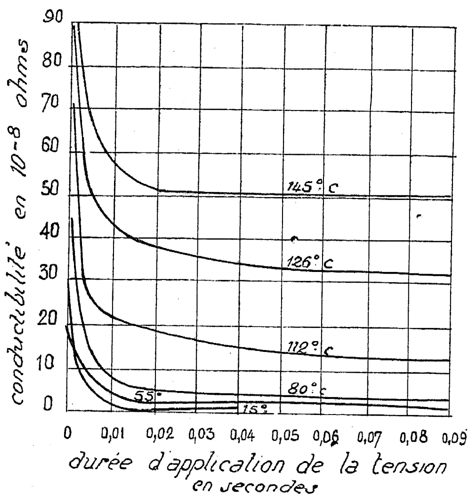


Fig. 2. — Absorption diélectrique dans le verre.

aucune perte d'énergie ; le courant de charge Ic serait en avance d'un quart de période exactement sur la différence de potentiel E.

Le seul condensateur réalisant approximativement cette condition utilise des gaz comme diélectrique.

Dans le cas d'un diélectrique solide, et même s'il n'y a pas d'absorption diélectrique, il y a dépense d'énergie.

Si nous désignons par i le courant de fuite, par I le courant total, le facteur de puissance cos φ est une fonction directe des pertes, et sa valeur peut être considérée comme la véritable mesure de la qualité du diélectrique en essai.

L'on a pris l'habitude de considérer le cosinus de (90° — φ) c'est-à-dire sinus φ ou angle δ. C'est δ qui est appelé *angle de perte* ou encore

différence de phase ; cet angle δ caractérise le diélectrique (1) (fig. 1).

Un certain nombre de causes agissent sur la grandeur de cet angle de perte.

Elles ont été particulièrement bien définies par J.-B. WHITEHEAD.

Ce sont : *a*) l'absorption diélectrique ;
b) la conductivité normale ;
c) la conductivité anormale ;
d) l'humidité ;
e) l'hystérésis diélectrique ;
f) l'ionisation gazeuse.

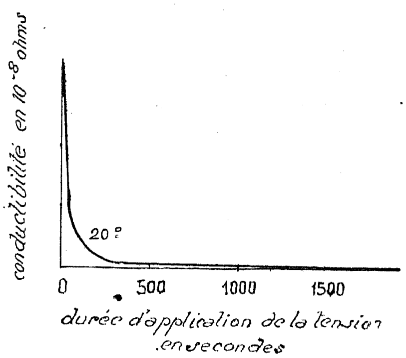


Fig. 3. — Absorption diélectrique dans le mica.

a) *Absorption électrique.* — Il résulte des nombreuses études effectuées que l'absorption diélectrique semble être le facteur le plus important dans la production des pertes diélectriques.

La figure 2 représente l'absorption diélectrique dans le verre (Expériences d'HOPKINSON) ; la figure 3 est une courbe d'absorption électrique dans le mica d'après J. CURIE.

Ces courbes donnent l'allure du courant d'absorption réversible.

Dans le cas des diélectriques liquides utilisés dans certaines circonstances, il existe également un courant individuel de charge décroissant de façon continue et désigné sous le nom de courant d'absorption irréversible.

L'absorption diélectrique apparaît généralement chaque fois qu'un diélectrique se compose d'une ou plusieurs matières différentes.

b) *Conductivité normale.* — Dans le cas du papier isolant imprégné,

(1) La mesure de l'angle de perte peut, dans certaines circonstances, conduire à une valeur négative apparente, comme par exemple dans l'étude de certains isolateurs en porcelaine.

elle n'entrerait que pour une fraction d'environ 1 pour cent dans le total des pertes.

c) *Conductivité anormale.* — Elle apparaît dans presque tous les diélectriques liquides et varie généralement en fonction de la tension et dans le temps.

Il résulte des nombreux essais effectués que cette conductivité est probablement ionique.

d) *Humidité.* — Une étude très complète sur cette question a fait l'objet d'une communication documentée de MM. WHITEHEAD et HAMBURGER à la Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques en 1927.

La figure 4 montre, dans le cas de papier imprégné, la variation

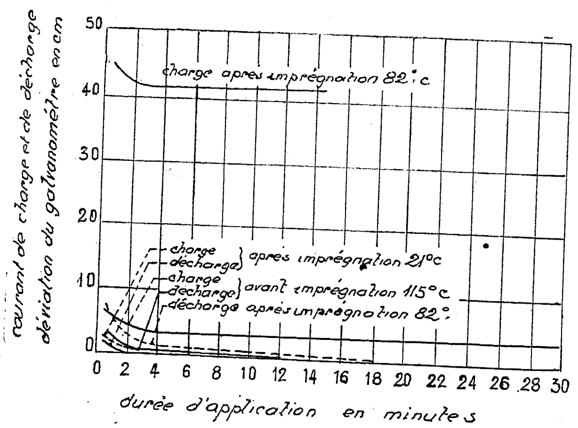


Fig. 4. — Courbes de charge et décharge de papier pour câbles avant et après imprégnation (WHITEHEAD).

rapide des déviations du galvanomètre au bout d'une minute et à la fin du phénomène, en fonction de l'augmentation de température.

Il résulte des essais effectués que pour toutes les pressions jusqu'à 10 cm de mercure, les courbes du facteur de puissance ont, à quelques exceptions près, une même allure caractéristique.

Le degré hygrométrique de l'air en cours de fabrication et la nature du diélectrique utilisé justifient certaines variations qui viennent à se produire.

La figure 5 montre la variation du facteur de puissance, de la conductivité et de l'absorption en fonction de la température : les lectures du courant de charge étaient effectuées au bout d'une demi-minute et d'une minute.

e) *Hystérésis.* — Sur ce point les avis sont assez partagés ; l'on a émis l'hypothèse que des mouvements d'électrons ou des déformations

des molécules ou des atômes a une influence sur les pertes diélectriques.

Il est difficile actuellement de préciser ce point.

f) *Ionisation gazeuse.* — Le phénomène est suffisamment connu.

Le gaz ionisé est bon conducteur. En outre, les produits résultant de

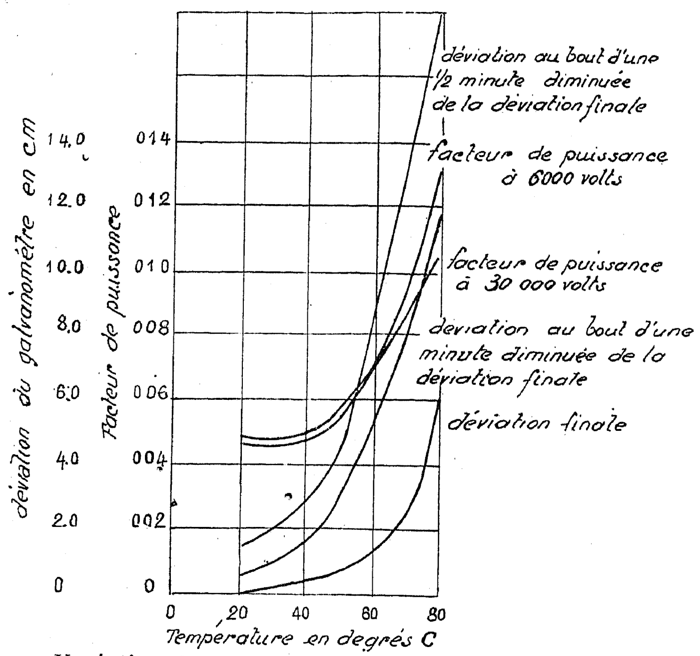


Fig. 5. — Variation du cos φ et absorption en fonction de la température.

l'ionisation attaquent les matières qui les entourent et les rendent conductrices.

Ces phénomènes d'ionisation apparaissant dans les câbles souterrains sous papier imprégné lorsque l'imprégnation incomplète laisse subsister des poches d'air et lorsque l'enveloppe de plomb n'épouse pas parfaitement le papier isolant.

D'une façon générale l'ionisation gazeuse a pour effet une augmentation des pertes diélectriques.

Ces différentes causes ayant été rapidement mentionnées, nous allons rappeler les procédés de mesures utilisés.

Méthodes de mesures.

Elles peuvent être divisées, ainsi que l'a fait M. de la Gorce dans le rapport documenté présenté aux quatrième et sixième Sections de la Société Française des Electriciens, en :

A. — *Méthodes directes*, qui permettent la mesure directe de la puissance dissipée dans le diélectrique.

B. — *Méthodes indirectes*, dans lesquelles on mesure l'angle de déphasage.

Les résultats obtenus au moyen de l'une ou l'autre de ces genres de méthode ne sont toutefois comparables que si la tension d'alimentation est sinusoïdale. (1).

A. — *Méthodes de mesures directes.*

1° *Wattmètre électrostatique.* — L'électromètre à quadrants ayant une consommation négligeable est évidemment tout indiqué pour les mesures des pertes dans les diélectriques. Le montage de principe est représenté par la figure 6.

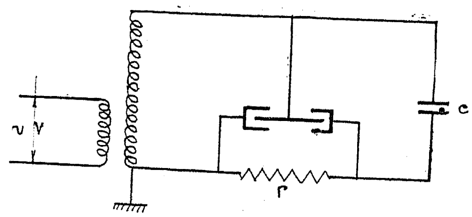


Fig. 6. — Méthode de l'électromètre shunté.

La tension totale est appliquée à l'aiguille de l'électromètre, les quadrants étant reliés à une résistance montée en série avec la capacité dont il s'agit de mesurer la perte.

Si l'on dispose d'une série de résistances appropriées que l'on monte en r, il est possible d'étudier des échantillons de nature différente dans des conditions de sensibilités comparables entre elles.

Pour des tensions supérieures à 20 kilovolts, cette méthode est difficile à utiliser par suite des dimensions auxquelles on est amené dans la réalisation de l'électromètre dont la durée d'oscillation est alors élevée.

Afin d'éviter l'influence de potentiels de contact, il est nécessaire d'utiliser un commutateur ; l'emploi d'un électromètre Curie permet d'atténuer les inconvénients qui en résultent.

Lorsque l'on se sert d'un électromètre à quadrants en haute tension,

(1) Voir Appendice I : Calculs du facteur de puissance dans le cas d'une tension non sinusoïdale.

il n'est pas possible de relier directement l'aiguille au réseau haute tension : il faut shunter l'électromètre ainsi que le représente la figure 7.

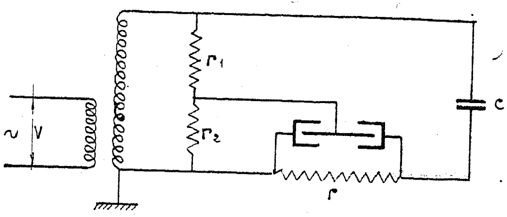


Fig. 7. — Montage de l'électromètre shunté.

La puissance est déterminée au moyen de la relation :

$$W = k \frac{\alpha}{cr} + \frac{k-2}{2} \cdot ri^2,$$

i, courant de charge du câble ou du diélectrique :

$$k = \frac{r_1 + r_2}{r_2},$$

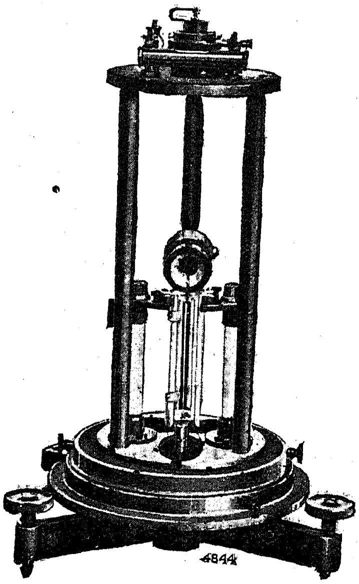


Fig. 8. — Electromètre d'AYRTON-MATHER.

α : valeur de la déviation lue
c : constante de l'électromètre
r, r_1 r_2 résistances non inductives.

Afin d'éviter les difficultés résultant de l'emploi de résistances pour diviser la tension, PETERSEN a utilisé des condensateurs.

Le wattmètre électrostatique d'AYRTON-MATHER, représenté par la figure 8, est applicable dans cette mesure en effectuant le montage

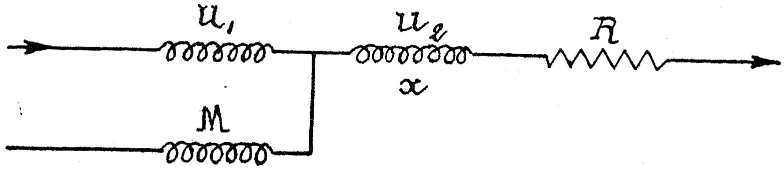


Fig. 9. — Montage d'IRWIN.

indiqué par IRWIN (fig. 9), M est une mutuelle inductance dont la différence de potentiel induite U_1 est de valeur approximativement égale et opposée à la différence de potentiel U_2 du circuit x étudié.

Dans l'appareil d'AYRTON-MATHER, l'aiguille est remplacée par deux plateaux de forme cylindrique montés entre deux inducteurs cylindriques en aluminium.

2° *Wattmètre électrodynamique.* — Le montage généralement utilisé est celui représenté par la figure 10 ; C est le condensateur ou le câble étudié ; *r* une résistance non inductive, *a* et *b* les bobines

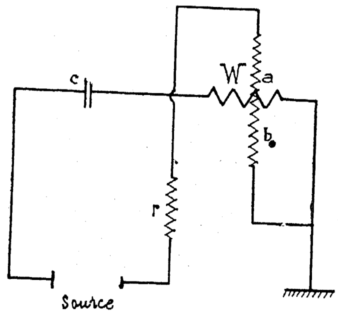


Fig. 10. — Méthode du wattmètre électrodynamique.

fixe et mobile de l'électrodynamomètre W. Il est nécessaire de prendre un certain nombre de précautions spéciales qui ont été exposées d'une façon très complète par M. FRIGON.

En particulier, les erreurs dues aux effets de capacité, peuvent être sensiblement réduites, en disposant un écran autour de l'électrodynamomètre.

Lorsque l'on procède à des mesures en haute tension, il n'est plus possible d'opérer directement en reliant l'électrodynamomètre au circuit haute tension, étant données les conditions d'isolement élevées,

que doit réaliser l'appareil de mesures. Dans ce cas, l'on a recours soit à un montage avec résistance additionnelle à haute tension, soit à un transformateur de potentiel.

Les résistances utilisées ne doivent présenter ni self-induction, ni capacité. Elles sont généralement prévues pour laisser passer un cou-

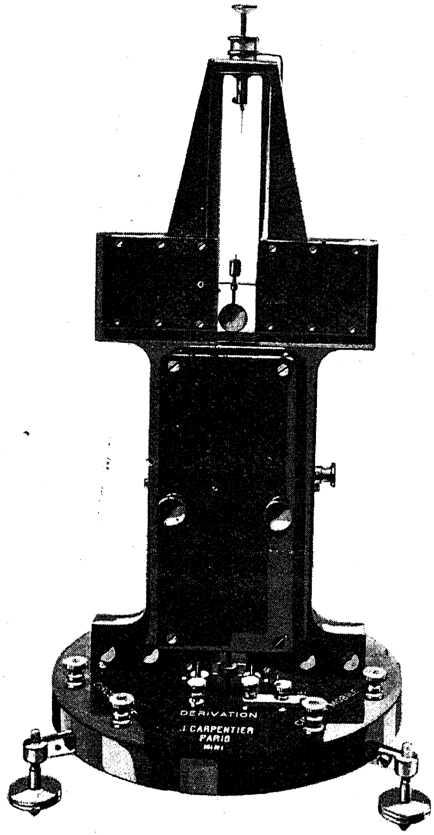


Fig. 11. — Electrodynamomètre astatique J. CARPENTIER

rant de 100 milliampères, sous une tension qui peut atteindre 100 000 V.

Si l'on utilise un transformateur de potentiel, il est indispensable de déterminer très exactement la valeur de l'écart angulaire entre la tension primaire et la tension secondaire de cet appareil.

Une documentation aussi intéressante que complète, concernant l'application de ces méthodes de mesures à la détermination des pertes dans les câbles et les diélectriques en courant monophasé et triphasé à très haute tension, a été publiée par MM. CAPDEVILLE et LAROCHE

dans la *Revue Générale de l'Electricité*, en octobre et novembre 24 (1).

Les électrodynamomètres actuellement utilisés sont du modèle à miroir. Ils doivent être exempts de toute pièce métallique afin d'éviter la production de courants de Foucault.

L'appareil représenté par la figure 11, répond à ces conditions. Il comporte un amortisseur à air constitué par des palettes de mica se déplaçant à l'intérieur d'une chambre fermée. Cet appareil à bobines

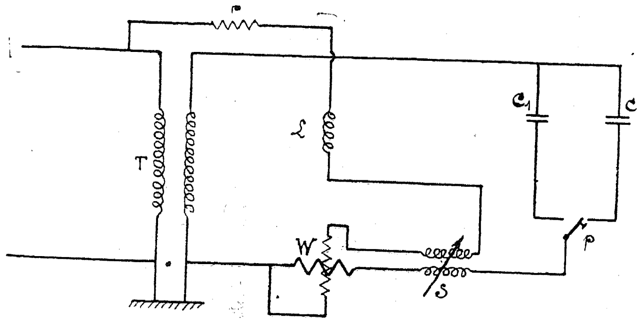


Fig. 12. — Méthode du wattmètre compensé.

T, transformateur haute tension; C_1, condensateur à air; C, condensateur ou câble à essayer; W, wattmètre compensé; S, variomètre; L, self-induction variable; r, résistance non inductive; ρ, commutateur.

amovibles, permet d'obtenir toutes les sensibilités désirables. Sa période d'oscillation est de 17 secondes, et il n'est pas réglé à l'amortissement critique. La déviation obtenue est de 120 mm pour $I. i = 30.10^{-6}$.

3° *Wattmètre compensé.* — La méthode en a été exposée en octobre 1916, par SHANKLIN dans le *General Electric Review*. Elle est basée sur l'utilisation d'un transformateur de potentiel qui sert à alimenter l'enroulement fil fin de l'électro-dynamomètre.

Il est nécessaire de compenser le déphasage entre les tensions primaire et secondaire, et cette compensation est réalisée au moyen d'une inductance variable S qui shunte le circuit fil fin (fig. 12).

On s'assure que la compensation est réalisée de la façon suivante :

Le condensateur ou le câble à étudier C est remplacé par un condensateur à air C_1 au moyen d'un commutateur P, si la compensa-

(1) Méthodes de mesure des pertes dans les diélectriques en courant monophasé à très haute tension (25 octobre 1924).

Méthodes de mesure des pertes diélectriques en courant triphasé à très haute tension (6 décembre 1924).

Toutefois la méthode basée sur l'utilisation d'une résistance liquide n'est pas à conseiller, du fait des variations de résistance inhérentes à la résistance liquide même, variations qui peuvent modifier l'étalonnement de l'appareil de mesures.

tion a bien été réalisée le spot de l'électrodynamomètre W doit rester au zéro.

La méthode de mesure utilisée par MM. Capdeville et Laroche et consistant en l'emploi de 2 électrodynamomètres de sensibilité différente permet de diminuer l'erreur possible de mesure, la lecture se faisant simultanément sur les deux appareils.

4° *Méthode calorimétrique* (fig. 13). — Décrite par E.-S. Lee, elle consiste à disposer dans une même boîte, hermétiquement close,

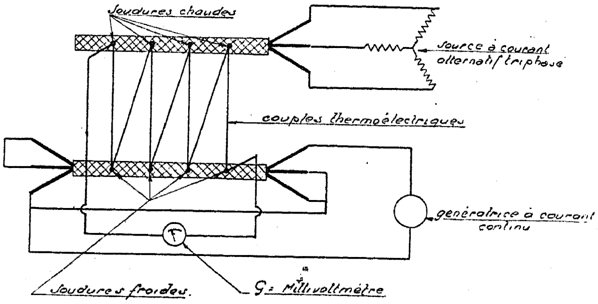


Fig. 13. — Méthode calorimétrique.

2 tronçons d'un même câble à étudier. L'expérience fut effectuée sur des câbles triphasés. L'un des tronçons de câble fut alimenté par une source de courant triphasée et l'autre par une génératrice à courant continu. Un certain nombre de couples thermoélectriques montés en série sont disposés entre les 2 enveloppes de plomb des cadres : les soudures chaudes étant placées le long de l'enveloppe du tronçon de câble à étudier et les soudures froides le long de l'enveloppe du câble alimenté en courant continu.

Un millivoltmètre est relié aux couples thermoélectriques et l'alimentation du câble en courant continu est effectuée jusqu'à ce qu'on obtienne l'équilibre au millivoltmètre, c'est-à-dire l'équilibre de température entre les deux tronçons. L'auteur de cette méthode a admis que la puissance en courant continu, nécessaire pour obtenir dans le second câble un échauffement égal à celui du premier câble, correspondait aux pertes diélectriques dans le câble alimenté en courant alternatif.

B. — *Méthodes Indirectes.*

1° *Wattmètre utilisé comme indicateur de quadrature.* — Cette méthode a été employée par Emanueli.

Le schéma de principe est représenté par la figure 14. Si le courant i_1 dans la bobine b est faible par rapport au courant i, l'électrodynamomètre restera au zéro lorsque la condition

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\omega L}{R}$$

sera réalisée. L est la self-induction du circuit i_1 et R sa résistance.

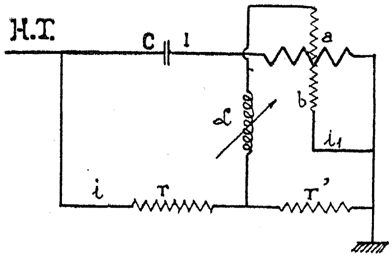


Fig. 14. — Montage d'Emanueli.

Cette condition est obtenue en réglant la self-induction variable L.

Le dispositif utilisé par le Laboratoire Central d'Electricité et qui est basé sur ce principe, présente l'avantage d'être correct dans les différents cas qui se présentent pratiquement (fig. 15).

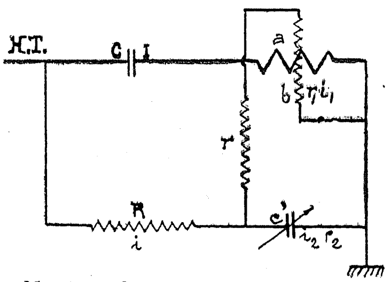


Fig. 15. — Montage du Laboratoire Central d'Electricité (montage d'Emanueli modifié).

Soit E la tension d'alimentation appliquée au condensateur ou câble à étudier, I le courant de charge dans le câble ; L, le coefficient de sel-induction de la bobine b; i, i_1 i_2 les courants traversant respectivement les résistances R, r_1 r_2.

En supposant, d'autre part, que la condition

$$c = \frac{L}{\rho^2 + \omega^2 L^2}$$

soit remplie et l'électrodynamomètre à l'équilibre, on peut en conclure que les courants I et i_1 sont en quadrature et on a la relation :

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\omega L}{\rho}.$$

ρ est une résistance égale à la somme de la résistance r et de la résistance de la bobine b.

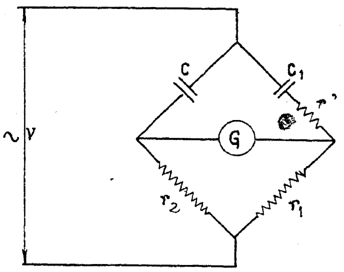


Fig. 16. — Méthode du pont de Sauty.

Pour procéder à la mesure, on règle la capacité C′ et la résistance ρ de façon à amener le wattmètre au zéro.

2° *Méthode du pont de Sauty.* — Utilisé en courant alternatif, le pont de Sauty permet de comparer les pertes diélectriques de 2 condensateurs. La disposition du montage est représentée par la figure 16 ;

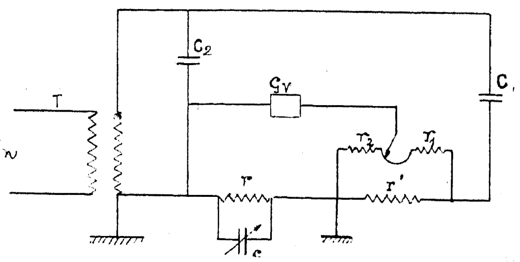


Fig. 17. — Méthode du pont de Shéring.

C étant le condensateur à étudier et C_1 le condensateur sans perte. Lorsque l'équilibre est obtenu au pont, on a la relation

$$x = r' \cdot \frac{r_1}{r_2},$$

d'où

$$\operatorname{tg} \delta = r' \cdot \frac{r_1}{r_2} \cdot \omega C.$$

Il est entendu que les résistances r', r_1, r_2 sont des résistances non inductives.

3° *Méthode du pont de Schéring.* — Elle permet de mesurer simul-